

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELEND TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN

SAMENHANGENDE MET DE PRODUKTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

ENIGE BESCHOUWINGEN OVER NUMERIEKE BESTURING VAN GEREEDSCHAPSWERKTUIGEN

door T. J. VIERSMA *).

621.9-523.8

*In het onderstaande artikel is, vrijwel ongewijzigd, de tekst weergegeven van de openbare les die Dr. Ir. T. J. Viersma op 4 oktober 1962 heeft gegeven bij de aanvaarding van het ambt van lector aan de Technische Hogeschool te Delft. De voordracht**) is hier met vriendelijke medewerking van de auteur aangevuld met enkele figuren en literatuuropgaven. Het in deze voordracht behandelde vormt in dit tijdschrift tevens een passende inleiding tot een reeks van drie artikelen die binnenkort zullen verschijnen, en waarin een numeriek bestuurd freesbank zal worden beschreven die in het Philipslaboratorium te Eindhoven is ontwikkeld.*

Inleiding

Sedert 1950 heeft de automatisering van gereedschapswerktuigen (freesbanken, draaibanken etc.) geleid tot een techniek waarbij de informatie voor bediening en besturing van de machine in numerieke vorm wordt toegevoerd. De numerieke informatie, veelal in de vorm van een ponsband gegeven, omvat het gehele programma van uit te voeren verplaatsingen, en van snelheden en toerentallen van de bank. Evenals bij het aloude Hollandse draaiorgel levert elke „ponsband” dus een bepaald „werkstuk”.

De fundamentele problemen bij deze nieuwe techniek laten zich in twee groepen indelen. Het eerste probleem is dat van de informatieverwerking. Hierbij worden de gegevens van het werkstuk (die b.v. van tekeningen worden overgenomen) gecombineerd met gegevens over de bewerkingsmethode en de machine, en verwerkt tot commando's aan de machine. In de meer gecompliceerde gevallen wordt daarbij gebruik gemaakt van elektronische rekenmachines. Het tweede probleem betreft de meet- en regeltechniek, dat wil hier dus zeggen de wijze waarop de gegeven commando's uitgevoerd worden.

Ten einde enig inzicht te verkrijgen in de eisen

die aan de informatieverwerking en de meet- en regeltechniek gesteld worden, bezien we allereerst enige algemene punten die bij numerieke besturing van belang zijn.

We bevinden ons in het gebied der gereedschapswerktuigen, waarbij bepaalde gereedschappen zoals frees, boor of beitel door middel van verspanende bewerkingen vorm geven aan een werkstuk. Daartoe voert dit gereedschap relatieve bewegingen uit ten opzichte van het werkstuk. Deze bewegingen kunnen rechtlijnig zijn, waarbij het werkstuk of gereedschap zich bevindt op een in langsrichting verplaatsbare slede, ofwel draaiend. Daarbij kan het werkstuk draaien (draaibank, draaitafel) ofwel het gereedschap (boor, frees). Meestal is er een combinatie van een of meer rechtlijnige en draaiende bewegingen. Om dit vrij gecompliceerde geheel van translaties en rotaties te kunnen beheersen, moeten vele handelingen verricht worden, waarvoor een enorme hoeveelheid informatie vereist wordt. Bij numerieke besturing wordt deze informatie in principe zonder menselijke tussenkomst toegevoerd en vervolgens omgezet in de vereiste handelingen.

Een essentieel deel van de informatie betreft de afmetingen van het werkstuk. Bij de klassieke besturing van gereedschapswerktuigen worden deze afmetingen gerealiseerd door een vakman, die de werkstuktekeningen raadpleegt en de aangegeven maten vertaalt in overeenkomstige sledeverplaat-

*) Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

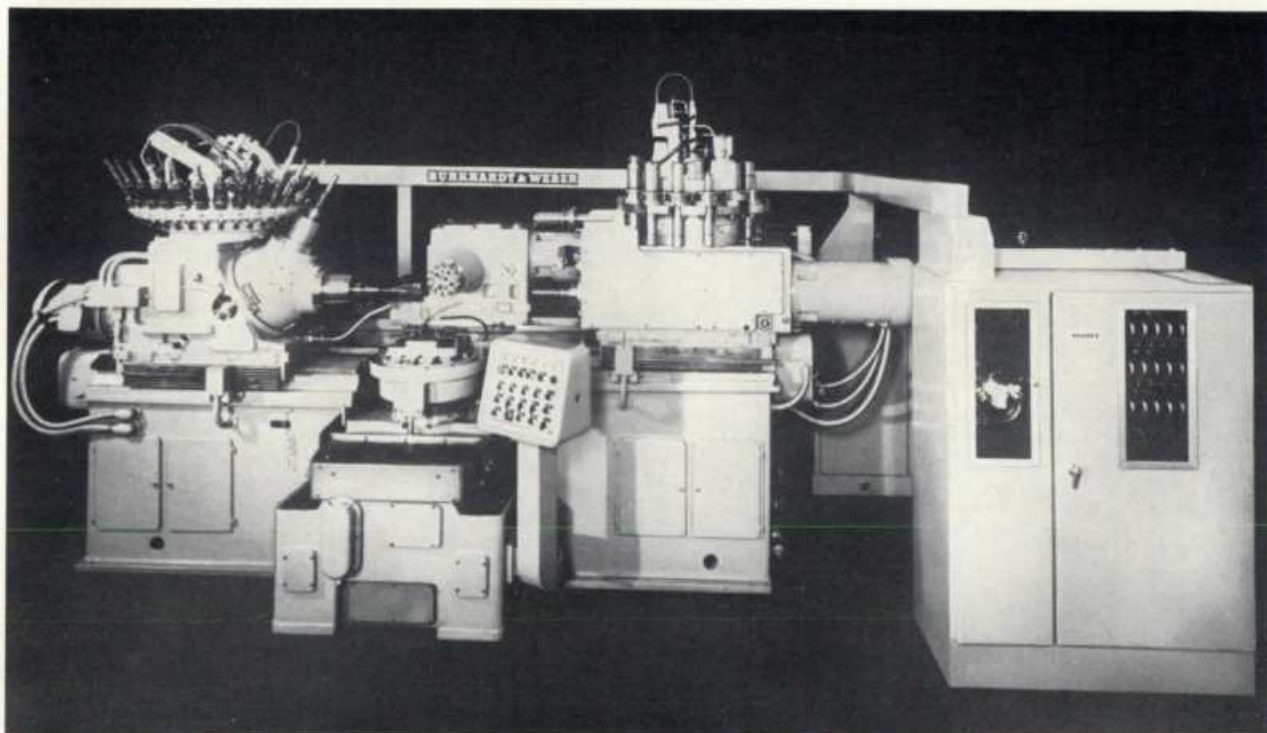
**) De voordracht is uitgegeven door Uitgeverij Waltman, Delft.

singen. Bij numerieke besturing wordt zonder tussenkomst van tekening en man direct verplaatsingsinformatie aan de machine toegevoerd. Deze informatie en de wijze waarop ze verwerkt wordt, hangen uiteraard direct samen met de nauwkeurigheid van het werkstuk. Een der belangrijkste aspecten van numerieke besturing van gereedschapswerktuigen is dan ook de bereikbare nauwkeurigheid. In sommige gevallen is deze een factor 10 beter dan bij de klassieke methodes.

Een eveneens zeer belangrijk deel van de informatie betreft de snelheid waarmee de rechtlijnige en

groot deel van het vakmanschap verhuist naar de werkvoorbereiding en zo bij voorbeeld op rekening komt van de programmeur, die het rekenmachineprogramma voor de vervaardiging van de ponsband verzorgt. De hieraan verbonden problemen zijn zo groot, dat het voortschrijden der techniek van de numerieke besturing van gereedschapswerktuigen voor een groot deel afhangt van de wijze waarop deze opgelost worden.

Een verder mogelijke informatie betreft de gereedschapskeuze en wisseling. Het in positie brengen van successieve gereedschappen, zoals bij een revolver-



Werkfoto Burkhardt & Weber, Reutlingen / Württ.

Fig. 1. Numeriek bestuurd gereedschapswerktuig dat automatisch verschillende gereedschappen na elkaar in werking kan stellen. De gereedschappen bevinden zich in het magazijn links boven aan de machine. Rechts onder dit magazijn bevinden zich twee spullen op een draaibaar support. Terwijl met behulp van de horizontaal staande spil een bewerking wordt uitgevoerd, wordt in de andere spil reeds het gereedschap voor de volgende bewerking geplaatst, zodat het verwisselen van gereedschap niet veel tijd kost.

draaiende bewegingen uitgevoerd worden. In de taal der gereedschapswerktuigen wil dit dus zeggen: voedingen en snijnsnelheden. De grootte van de snelheden is tot op zekere hoogte bepalend voor de produktiviteit. Bij de klassieke technieken verwerft de vakman deze informatie tijdens de vakopleiding, waarbij dus als het ware de kennis aangaande verspaningstechniek en gereedschapswerktuigen in de vakman geïnvesteerd wordt. Bij numerieke besturing wordt ook deze informatie veelal volledig via ponsband toegevoerd. Dit impliceert dat een

bank, kan ook geheel numeriek bestuurd worden. Er zijn enige spectaculaire gevallen bekend waarbij een geheel nieuw type gereedschapswerktuig is ontstaan met enige tientallen gereedschappen, die successievelijk in positie en in actie gebracht worden, soms verschillende tegelijk (fig. 1). Hier heeft de numerieke besturing dus duidelijk invloed op de conceptie van het gereedschapswerktuig. Daarentegen worden ook bij zeer vele numeriek bestuurd gereedschapswerktuigen de gereedschapskeuze en wisseling geheel aan de bedienende man overgelaten.

Toepassingsgebied van numerieke besturing

Het toepassingsgebied van numerieke besturing ¹⁾ valt uiteen in twee delen:

- 1) Het zg. contouren, waarbij tijdens het verspaningsproces verschillende bestuurde bewegingen gelijktijdig plaatsvinden, die zeer nauwkeurig op elkaar afgestemd zijn.
- 2) Het zg. positioneren, waarbij doorgaans slechts één bestuurde beweging tegelijk plaatsvindt (point to point).

Aangezien de verschillen ten aanzien van de informatieverwerking en de meet- en regeltechniek bij contouren en positioneren vrij groot zijn, zullen we hierna deze twee toepassingsgebieden in hoofdzaak apart behandelen. We bespreken eerst enige algemene aspecten van het contouren en noemen ter illustratie enige karakteristieke voorbeelden, waarbij met de klassieke methodes de vereiste nauwkeurigheid moeilijk bereikbaar is en tevens de produktiviteit gering is: vliegtuigvleugels; bladen van scheepsschroeven en turbines; nokschijven; matrijzen.

Het vervaardigen van een prototype van dergelijke werkstukken gebeurt tot dusver in feite met de hand. Eerst worden — bij voorbeeld op een coördinatenboormachine — een groot aantal punten van de contour gemarkeerd. Vervolgens wordt een „vloeiend” oppervlak door deze punten bereikt door middel van vijlen, slijpen, schuren e.d.: feitelijk dus een interpolatiemethode, gebaseerd op het oog van de vakman. Ondanks slimme technieken, waardoor soms een aanzienlijke vereenvoudiging van de werkzaamheden kan worden bereikt, berusten nagenoeg alle contourbewerkingen op deze moeizame, tijdrovende en relatief onnauwkeurige handmethodes. De voordelen van numerieke besturing springen hier wel zeer duidelijk in het oog: continu verspanend worden de onderling gecoördineerde bewegingen snel en precies uitgevoerd. Vergeleken met de klassieke methodes kunnen nauwkeurigheid en produktiviteit dan ook gemakkelijk het tienvoudige bedragen. Een algehele doorbraak van numeriek bestuurde contourbanken wordt alleen nog in de weg gestaan door de werkvoorbereiding en de informatieverwerking, de technische (d.w.z. elektronische en mechanische) problemen leveren nl. in principe geen moeilijkheden meer op.

Ter voorkoming van misverstand zij opgemerkt dat numerieke contourbesturing speciaal geschikt is voor de enkel- en de kleine seriefabricage. Uitgaan-

de van een nauwkeurig prototype kunnen grotere series veel efficiënter door middel van een of andere kopieertechniek vervaardigd worden.

Behalve het contouren als toepassingsgebied van numerieke besturing komt de laatste jaren positioneren sterk naar voren, en wel bij verschillende types gereedschapswerktuigen (contouren gebeurt vrijwel uitsluitend op freesbanken). Het merkwaardige is dat deze eenvoudiger vorm van numerieke besturing het laatst tot ontwikkeling gekomen is. Voorbeelden van machines die voor positioneren worden gebruikt, zijn: coördinatenboormachines; freesbanken; kotterbanken; draai- en revolverbanken.

Kenmerkend voor dergelijke numeriek bestuurde machines is, dat een vrij groot aantal verschillende handelingen en bewerkingen in zeer snelle opeenvolging plaatsvinden. Het grote voordeel is hierbij, dat de tot dusver gebruikelijke tijden voor instellen, meten, aflezen en nadenken tot een minimum gereduceerd worden, waarbij tevens de vermoeidheidsfactor alsmede de kans op vergissingen praktisch geëlimineerd worden. Verspaningstechnisch gezien, biedt numerieke besturing hier principieel echter geen nieuwe mogelijkheden. De nauwkeurigheid bij voorbeeld wordt in principe in het geheel niet verbeterd. Hier is het voornamelijk de produktiviteit die de invoering van numerieke besturing moet rechtvaardigen. Dat hier grote mogelijkheden bestaan, zal een ieder duidelijk zijn die wel eens multimomentopnamen in een werkplaats heeft uitgevoerd om vast te stellen welk percentage van de werktijd er werkelijk effectief verspaand wordt op gereedschapswerktuigen. Afhankelijk van het soort werkplaats varieert dit percentage van 5 tot 25. Bij numerieke besturing is een veelvoud hiervan heel goed bereikbaar.

Het probleem van de informatieverwerking en van de meet- en regeltechniek is bij positioneren veel eenvoudiger dan bij contouren. In feite gebeurt er steeds het volgende:

- 1) Keuze uit de verschillende bewegingsmogelijkheden.
- 2) Keuze van begin- en eindpunt van de beweging.
- 3) Keuze van de snelheid van de beweging.

Zo kan dus in principe door het vastleggen van slechts drie getallen een volledig bewerkingstraject gedefinieerd worden. Het aantal trajecten bedraagt gewoonlijk niet meer dan enige tientallen, zodat de totale informatie relatief beperkt en eenvoudig is.

Meet- en regeltechnische aspecten

Daar belangrijke gezichtspunten van de informatieverwerking bij numerieke besturing mede bepaald

¹⁾ Zie b.v. John D. Cooney, Automatic metalworking: a status report, Control Engng. 7, no. 9. 158-173, 1960.
C. A. Sparkes, Automatically controlled machine tools, Chartered mech. Engr. 9, 298-305, 1962 (no. 6).

worden door de meet- en regeltechnische uitvoeringsorganen, bespreken we deze het eerst.

Zoals uit het voorgaande is gebleken, betreft het belangrijkste meet- en regeltechnische probleem het realiseren van nauwkeurig voorgeschreven bewegingen. Voor het doen uitvoeren van een beweging is een aandrijving, voor de meting een meet-systeem nodig. Daarnaast is een vergelijkingsorgaan vereist, om te zien in hoeverre de gewenste beweging (ingangssignaal f_i) met de uitgevoerde beweging (uitgangssignaal f_o) in overeenstemming is (fig. 2). De eisen die aan de aandrijving en het meet-systeem gesteld worden, zijn o.m. afhankelijk van:

- de wijze waarop hetingangssignaal f_i als functie van de tijd t verloopt;
- de toelaatbare afwijking $\varepsilon = f_i - f_o$, bij voorbeeld als functie van de tijd;
- de mogelijkheid tot aanpassing bij de rest van het numerieke besturingsysteem, met name aan de laatste fase van de informatieverwerking, die de vorm bepaalt waarin het commando f_i beschikbaar komt.

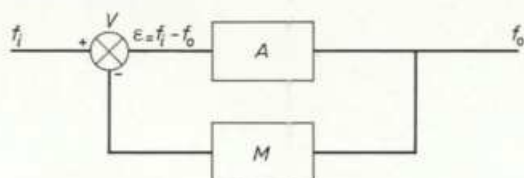


Fig. 2. Blokschema van een tegengekoppeld regelsysteem met aandrijving A , meetsysteem M en vergelijkingsorgaan V . f_i is hetingangssignaal dat de gewenste beweging aangeeft, f_o is de gerealiseerde beweging, $\varepsilon = f_i - f_o$ is de afwijking.

De aandrijving

Met betrekking tot de aandrijving beschouwen we in eerste instantie de situatie bij een eenvoudig positioneringssysteem: een coördinatenboormachine. Na het boren van een gat en het terugtrekken van de boor moeten de coördinaten van het volgende gat zo snel mogelijk ingesteld worden (om geen tijd verloren te laten gaan). De ingangssignalen f_i veranderen doorgaans sprongvormig als functie van de tijd (fig. 3). Als eis ten aanzien van de afwijking $\varepsilon = f_i - f_o$ wordt meestal gesteld, dat ε „zo snel mogelijk” beneden een bepaalde grenswaarde δ ($\approx$ meetnauwkeurigheid) moet dalen. De fout ε mag dus tijdelijk wel groot zijn, als de waarde δ maar spoedig bereikt wordt. De kortst mogelijke looptijd kan worden bereikt, indien een hydraulische servomotor²⁾ en een continu informatie leverend meetsysteem worden toegepast en enig doorschieten (overshoot) toegestaan wordt. Als doorschieten on-

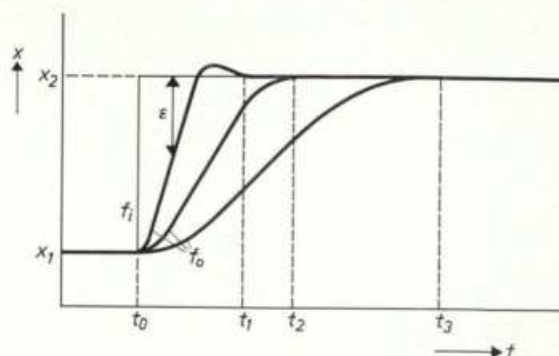


Fig. 3. Ingangssignaal f_i en uitgangssignaal f_o van het regelsysteem bij positioneren, voor verschillende instellingen van de regeling. Hierbij moet het gereedschap, in de tijd tussen twee opeenvolgende bewerkingen, ten opzichte van het werkstuk worden verplaatst van positie x_1 naar positie x_2 . Aan het regelsysteem wordt hiertoe een sprongvormig ingangssignaal toegevoerd. De afwijking ε moet nu zo snel mogelijk beneden een bepaalde grenswaarde komen; doorschieten is hierbij in het algemeen toegestaan. De looptijd van t_0 tot t_1 , t_2 of t_3 wordt o.a. bepaald door de keuze van de aandrijving en de instelling van de regeling.

toelaatbaar wordt geacht, moet de regeling trager ingesteld worden, met als gevolg een langere looptijd.

Wordt een hydraulische aandrijving te duur geacht, en wordt in plaats daarvan bij voorbeeld een wervelstroomkoppeling toegepast (met een in verhouding zeer grote tijdconstante), dan neemt de looptijd nogmaals aanzienlijk toe. Dit eenvoudige voorbeeld toont dus al aan dat er een compromis gesloten moet worden tussen de prijs van het aandrijfsysteem en de bereikbare kwaliteit, in dit geval de looptijd.

Dit geldt nog in versterkte mate voor de situatie bij numeriek bestuurd ketter-, draai- en freesbanken die worden gebruikt voor het zg. positioneren en voeden. In tegenstelling met het voorgaande wordt hier tijdens de beweging verspaand (fig. 4). Daarbij is dus niet alleen het begin- en

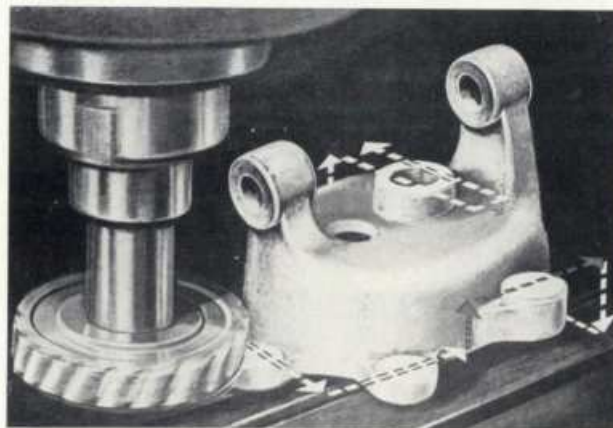


Fig. 4. Voorbeeld van „positioneren en voeden” met behulp van een freesbank. De frees voert hierbij achtereenvolgens de rechtlijnige bewegingen uit die door de pijltjes zijn aangegeven. Tijdens deze bewegingen wordt verspaand. (Gereproduceerd met toestemming van The Chartered Mechanical Engineer, Londen.)

²⁾ T. J. Viersma, Investigations into the accuracy of hydraulic servomotors, dissertatie Delft, 1961. Deze dissertatie is tevens gepubliceerd in Philips Res. Repts. 16, 507-596, 1961 (no. 6) en 17, 20-78, 1962 (no. 1).

eindpunt der beweging van belang, maar ook de bewegingssnelheid. De hoogste toelaatbare snelheid wordt meestal bepaald door de verspaningstechniek: standtijd van het gereedschap, oppervlakteruwheid, e.d. Het is hierbij dus van belang dat de beweging binnen zekere — niet zeer nauwe — grenzen met de juiste snelheid uitgevoerd wordt. Onderweg mag de afwijking $\varepsilon = f_i - f_o$ dus nog vrij aanzienlijk zijn, indien begin- en eindpunt maar nauwkeurig gerealiseerd worden (fig. 5). In de meeste gevallen is doorschieten ontoelaatbaar vanwege de werkstukspecificaties. Een en ander stelt reeds aanzienlijk hogere eisen aan het aandrijfsysteem dan bij het vorige voorbeeld. Ook hier weer is de hydraulische servomotor superieur, maar tevens duur.

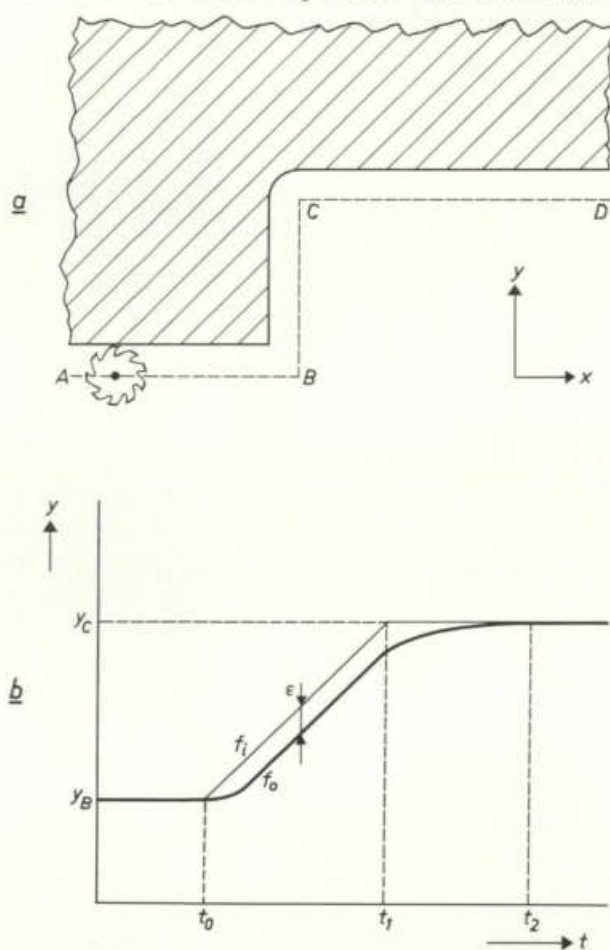


Fig. 5. Positioneren en voeden.

a) Bij het vervaardigen van een werkstuk van de aangegeven vorm met behulp van een freesbank moet de frees in de baan ABCD beschrijven. De frees voert dus rechtlijnige bewegingen uit in x- en y-richting, waarbij tijdens de beweging wordt verspaand.

b) Ingangssignaal f_i en uitgangssignaal f_o van het regelsysteem tijdens de verplaatsing van de frees in de y-richting van B naar C. Horizontaal is de tijd uitgezet. De toelaatbare bewegingssnelheid, die de helling van f_i tussen t_0 en t_1 bepaalt, wordt gegeven door de snelheid waarmee kan worden verspaand. Tijdens de gehele beweging moet ε beneden een bepaalde grenswaarde blijven. In het algemeen is doorschieten ontoelaatbaar, zodat het laatste gedeelte van de beweging (van t_1 tot t_2) kruipend moet gebeuren.

De laatste jaren is door enige Europese firma's een aandrijfsysteem met voorkeuzeschakeling van toerentallen en voedingen ontwikkeld, dat nauw aansluit bij de moderne ontwikkeling van gereedschapswerktuigen. De bewegingen voor de voeding worden hierbij door middel van een tandwielkast afgeleid van een elektromotor. Dit gebeurt door met elektromagnetische koppelingen de juiste tandwielcombinaties te kiezen. Het commando hiervoor kan op eenvoudige wijze van de informatiedrager worden betrokken. Een dergelijk systeem heeft het voordeel nauw aan te sluiten bij de bestaande techniek, en het kan derhalve, als het in nauwe samenwerking met de fabrikanten van gereedschapswerktuigen ontwikkeld wordt, met minimale krachtsinspanning tot succes leiden. Regeltechnisch gezien echter is dit systeem verre van ideaal. Het eindpunt van een bepaald traject wordt nl. bepaald door de uitloop na het uitschakelen van een elektromagnetische koppeling. Deze uitloop is o.m. afhankelijk van de schakeltijd van de koppeling, van de snelheid waarmee de uitloop begint, en van de belasting (verspaningskrachten, massa en wrijving). Zonder ingrijpende maatregelen is het praktisch ondoenlijk de variaties in deze uitloop binnen redelijke grenzen te houden. Het overgaan op een zg. kruipgang voor het laatste deel van het traject, of het introduceren van een rem, behoort tot de meest voor de hand liggende middelen, al gaat daarmee weer een goed deel van de — betrekkelijke — eenvoud verloren. Een verder nadeel van deze methode is het feit dat de sterkstroomcircuits als storingsbron kunnen fungeren, waardoor de betrouwbaarheid van de informatieverwerking — met name de digitale — in gevaar gebracht wordt.

Bij positioneren en voeden neemt de hydraulische motor, gestuurd door een elektro-hydraulische klep, een steeds belangrijker plaats in. Deze motoren zijn continu regelbaar en hebben — mede dank zij speciale klepconstructies — een zeer geringe belastinggevoeligheid³⁾ (fig. 6). Het laat zich aanzien dat de hydraulische aandrijving steeds meer veld zal winnen, zeker als de regeltechnisch optimale oplossing nog beter benaderd wordt dan thans reeds het geval is. Het belangrijkste nadeel van de hydraulische aandrijving is, dat een — voor vele fabrikanten van gereedschapswerktuigen — geheel nieuwe conceptie van machines (zonder tandwielkast) vereist wordt, wat op niet te onderschatten praktische en psychologische weerstanden stuit.

Bezien we ten slotte de aan de aandrijving gestelde eisen bij numeriek bestuurd contourmachin-

³⁾ Zie hoofdstuk IV van de in ²⁾ aangehaalde dissertatie.

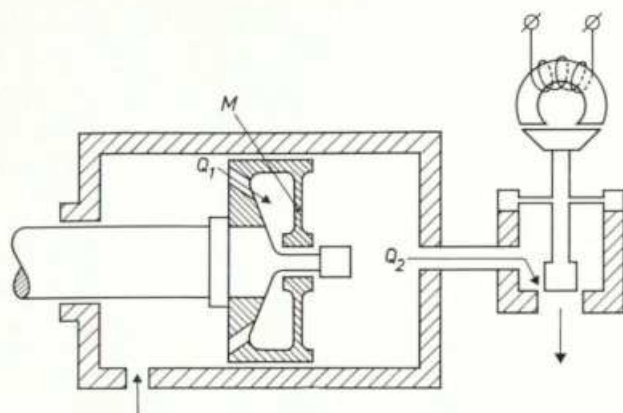


Fig. 6. Voorbeeld van een hydraulische servomotor met belastingcompensatie en elektromagnetisch bediende regelschijf. In de linkercilinderruimte wordt onder constante druk olie gepompt, die door een poort in de zuiger naar de rechtercilinderruimte stroomt en deze verlaat via de regelschijf. De beweging van de zuiger wordt bepaald door het verschil tussen de oliehoeveelheden Q_1 en Q_2 die in- en uit de rechterraimte stromen. Q_1 is in eerste benadering constant en Q_2 is evenredig met de grootte van de doorstroomopening in de regelschijf. De snelheid van de zuiger verandert daardoor evenredig met de verplaatsing van de schijf. Hydraulische servomotoren zijn van nature weinig gevoelig voor uitwendige belastingen. Bij de hier geschetste motor is daarenboven nog een extracompensatie aangebracht. Indien b.v. van links een kracht op de zuiger wordt uitgeoefend, stijgt de druk in de rechterraimte, waardoor Q_2 toeneemt. Doordat, als gevolg van de drukverhoging, het membraan M doorbuigt, wordt de doorstroomopening in de zuiger groter, zodat ook Q_1 toeneemt. Bij een juiste dimensionering van het membraan nemen Q_1 en Q_2 evenveel toe, zodat door de belasting geen extrabeweging van de zuiger ontstaat.

nes, dan blijkt ook hierbij de hydraulische motor met elektro-hydraulische servoschuif veruit superieur te zijn. En wat belangrijker is, de zeer gunstige eigenschappen van de hydraulische aandrijving voorzien hier in een behoefte op een wijze, die andere aandrijfsystemen praktisch uitsluit. Bij contourmachines worden nl. op elk moment stringente grenzen gesteld aan de afwijking $\varepsilon = f_i - f_o$, onafhankelijk van snelheid, versnelling en belasting. De integratie-tijdconstante van hydraulische servomotoren ligt in de orde van 3-10 milliseconden, die van elektrische servomotoren bedraagt een veelvoud hiervan. Een hydraulische servomotor kan diensgevolge vele malen sneller reageren op veranderende ingangssignalen dan een elektrische servomotor. Bovendien is de belastinggevoeligheid bij een hydraulische servomotor veel geringer, terwijl het vermogen dat hij kan leveren, aanzienlijk groter is. Het is dan ook niet te verwonderen dat de hydraulische servomotor op dit terrein in snel tempo de concurrenten verdringt en reeds nu de overhand gekregen heeft.

Meetsystemen

Op het gebied der meetsystemen heerst bij numerieke besturing nog een dusdanige chaos dat een volledige of overzichtelijke behandeling op dit

moment niet wel doenlijk is. We beperken ons dan ook tot het trekken van enige hoofdlijnen⁴⁾. De moeilijkheid van het meten bij numerieke besturing moge blijken uit de eisen die aan een ideaal meetsysteem gesteld worden: verplaatsingen in de orde van meters, tot op microns nauwkeurig meten en ogenblikkelijk in elektrische vorm presenteren! De stormachtige ontwikkeling blijkt wel duidelijk uit het feit dat er in 1950 nog geen enkel systeem bestond dat ook maar bij benadering aan de gestelde eisen voldeed, terwijl nu, in 1962, waarschijnlijk meer dan 100 systemen op de markt of in ontwikkeling zijn. Temidden van deze ontwikkeling is het van groot belang de situatie steeds nuchter en kritisch te analyseren.

De meest ideale meetmethode is de meting direct aan het werkstuk zelf, waarbij met uitschakeling van alle mogelijke invloeden (zoals speling en slijtage) de afmetingen bepaald worden. In de praktijk is dit tot op heden alleen mogelijk bij numeriek bestuurd slijpbanken. Er zijn enige voorbeelden bekend waarbij de werkstukdiameter tijdens het slijpen zelf met een capacatieve of inductieve opnemer wordt gemeten. Men spreekt hier van meetbesturing. Er zijn ook draaibanken met meetbesturing geconstrueerd, doch wegens meettechnische complicaties is deze toepassing gedoemd tot een kwijnend bestaan.

Behalve bij meetbesturing, worden de afmetingen van het werkstuk bij numerieke besturing steeds afgeleid van de verplaatsingen van sleden, draaitafels e.d. Deze methode heeft het nadeel dat elastische doorbuigingen en spelingen in lagers, in geleidingen en in de aandrijving, alsmede de slijtage van het gereedschap, de nauwkeurigheid van de meting ongunstig beïnvloeden. Nochtans wordt deze methode algemeen toegepast, daar er geen bruikbaar alternatief bestaat.

Bij het meten van de verplaatsingen van sleden e.d. onderscheiden we de directe en de indirecte methode. De meest gebruikte methode is de indirecte, waarbij een rotatie wordt gemeten die mechanisch is gekoppeld aan de translatie van de slede. Zo is het alom gebruikelijk de gemeten hoekverdraaiing van de aandrijvende schroefspil als maat te beschouwen voor de sledeverplaatsing. Deze methode is eenvoudig en goedkoop, maar er kan geen grote nauwkeurigheid mee worden bereikt. Door de energie-overbrenging treedt nl. onvermijdelijk slijtage op, die o.a. speling veroorzaakt. De meetnauwkeurigheid

⁴⁾ John D. Cooney en Byron K. Ledgerwood, 31 numerically controlled point-to-point positioning systems, *Control Engng.* 5 (1958), no. 1, 67-98; no. 2, 99-122; no. 3, 99-114.

die kan worden bereikt, bedraagt — afhankelijk van het type machine — 5 à 25 μm .

Een de laatste tijd in toenemende mate gebruikte indirecte meetmethode berust op een omzetting van translatie in rotatie door middel van heugel en rondsel. Deze transmissie staat los van de slede-aandrijving en wordt diensgevolge mechanisch vrijwel niet belast. Ze is daardoor nauwelijks onderhevig aan slijtage. Hoewel deze indirecte methode principieel te verkiezen is boven de zojuist genoemde methode, is de meetnauwkeurigheid vrij gering. De fabricagetechniek van heugel en rondsel laat in de praktijk nauwelijks een hogere meetnauwkeurigheid dan 10 μm toe.

De beste indirecte methode is ongetwijfeld die welke met een zg. meetspil werkt. Dit is een (niet voor de aandrijving gebruikte) schroefspil met een moerslot met circulerende kogels (recirculating ball nut) (fig. 7). Een dergelijke schroefspil is niet zelfremmend en kan de sledebewegingen dus volgen, en wel met grote precisie. Ook hier is de belasting alsmede de slijtage te verwaarlozen. De speling kan een fractie van een micron zijn, de nauwkeurigheid bedraagt — afhankelijk van lengte en prijs — 2-10 μm . Deze methode is in die gevallen, waarin andere methodes te onnauwkeurig blijken, ondanks de hogere prijs het meest aan te bevelen. Op internationale tentoonstellingen van gereedschapswerktuigen is deze methode tot nu toe slechts bij één grote Europese firma opgemerkt.

Vervolgens bespreken we de directe meetmethode, waarbij dus de sledeverplaatsing zonder mechanische transmissie gemeten wordt en omgezet in elektrische signalen. De oudste methode is na 1952 door het National Physical Laboratory in samenwer-

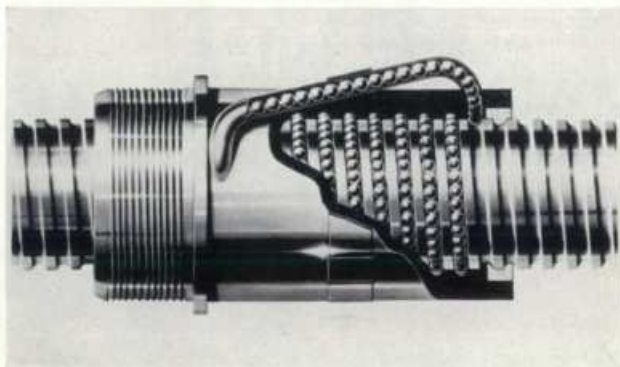


Fig. 7. Moerslot met circulerende kogels (recirculating ball nut). In de moer en in de as zijn spiraalvormige groeven aangebracht, waarin zich kogels bevinden. De moer kan zich op deze kogels over de as bewegen, op dezelfde wijze als een normale moer over een as met schroefdraad. De kogels die hierbij aan de ene zijde de moer verlaten, worden door een omloopgoot naar de andere zijde geduwd en daar weer in de groef gebracht. Bij de beweging van de moer over de as zijn de wrijving, de speling en de slijtage zeer gering. (Gereproduceerd met toestemming van Bristol Siddeley Engines Ltd, Coventry, Engeland.)

king met Ferranti Ltd. ontwikkeld en maakt gebruik van optische buigingstralies die ten opzichte van elkaar bewegen⁵⁾. Deze tralies hebben een zeer kleine steek (4 μm). Aan de ene zijde van de tralies plaatst men een lichtbron en aan de andere zijde enige fotocellen. Gebruik makend van het zg. moiré-effect (fig. 8) kan hier een meetnauwkeurig-

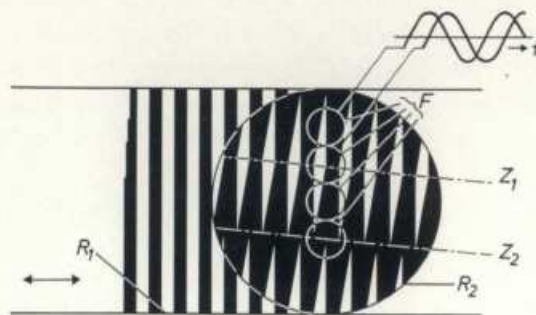


Fig. 8. Optisch meetsysteem met buigingstralies. De lange tralie R_1 is vast opgesteld; de korte tralie R_2 , die over een kleine hoek ten opzichte van R_1 is gedraaid, is bevestigd aan de slede waarvan de beweging moet worden gemeten. Aan de ene zijde van de tralies plaatst men een lampje, aan de andere zijde vier fotocellen F . Als de slede beweegt, ontvangen de fotocellen wisselende lichtintensiteiten. In het interferentiepatroon ontstaan lichte en donkere moiré-zones Z_1 en Z_2 , die zich ongeveer loodrecht op de bewegingsrichting van de tralie verplaatsen. De fotostromen van de vier fotocellen vertonen daardoor onderlinge fazeverschillen van 90° . Uit deze stromen kan zowel de richting als de grootte van de verplaatsing worden afgeleid met een nauwkeurigheid van $1/4$ van de steek van de tralies.

heid van 1 μm worden bereikt, doordat de tralieverdeling met een welhaast onvoorstelbare nauwkeurigheid over grote lengten is aangebracht. Dit zelfde systeem vindt nu in Duitsland navolging, zij het in een zeer eenvoudige uitvoering, die dan ook minder nauwkeurig is (meetfout 10 μm).

Een tweede directe meetmethode is ontwikkeld door Farrand Optical Co. Inc. en is vermaard geworden onder de naam „Inductosyn”. Dit systeem is te vergelijken met een synchro. Op een lange vaste plaat en op een korte bewegende plaat zijn „twee-dimensionele spoelen” met een speciaal periodiek windingspatroon aangebracht, waarbij een verplaatsing der platen langs elkaar als een verandering in de wederzijdse inductie gemeten kan worden (fig. 9). Over grote lengten schijnt een meetnauwkeurigheid van 2,5 μm bereikbaar te zijn. Deze inductieve methode heeft het voordeel in mechanisch opzicht zeer eenvoudig te zijn in vergelijking met optische en andere systemen.

Naast deze hoogwaardige directe meetsystemen dient ook nog het systeem met de zg. „elektrische aanslagen” of nokken vermeld te worden. Hoewel ik aarzel hieraan de naam meetsysteem te verbin-

⁵⁾ J. Guild, Diffraction gratings as measuring scales, Oxford University Press, Londen 1960.

den, verdient het zeker vermelding omdat deze aanslagen de laatste jaren in toenemende mate worden toegepast in tal van eenvoudige positioneermachines. Bij dit systeem bevinden zich verschillende microschakelaars op — evenwijdig met de sledebeweging aangebrachte — nokkenlijsten, die geschakeld worden door met de slede meebewegende stiftten. De schakelaars dienen voor het stoppen resp. starten van sledebewegingen. Het programma, dat wordt ontleend aan de informatietoever, bepaalt, welke beweging bij het bereiken van een bepaalde aanslag gestopt of gestart wordt. In feite bevinden

luut metende systemen. Een analoog meetsysteem levert een continu met de te meten waarde variërend signaal dat, indien het systeem tevens absoluut meet, steeds de absolute sledepositie representeert. Een digitaal systeem daarentegen meet in discrete stappen, de meetnauwkeurigheid kan dus nooit beter zijn dan de zg. meeteenheid, welke overigens in principe onbeperkt verkleind kan worden. Bij een vaak in combinatie hiermee gebruikte incrementele informatieverwerking wordt slechts de positieverandering (increment) en niet de positie zelf in veelvouden van de meeteenheid uitgedrukt ⁶⁾.

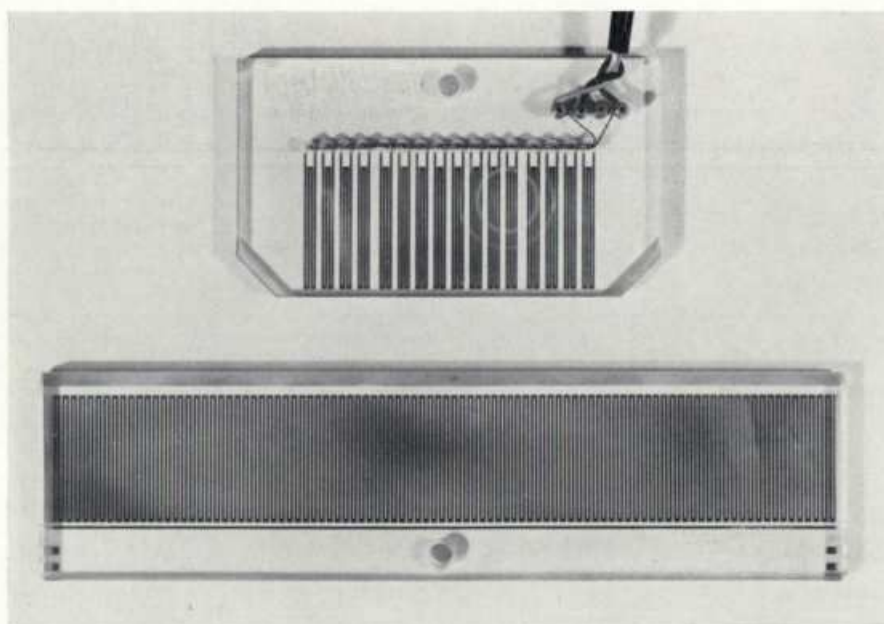


Fig. 9. Meetsysteem „Inductosyn”. Op twee glasplaten zijn tweedimensionele spoelen geëtst. De korte plaat is bevestigd aan de slede waarvan de beweging moet worden gemeten. De lange plaat, die hier voor de duidelijkheid apart is afgebeeld, is vast opgesteld op een zeer kleine afstand van de korte plaat. Het systeem werkt op dezelfde wijze als een synchro: de lange spoel kan worden beschouwd als de stator, de korte spoel, die bestaat uit twee delen welke ten opzichte van elkaar $\frac{1}{4}$ periode zijn verschoven, als de rotor. Een periode komt overeen met een verplaatsing van 2,5 mm. Als de lange spoel wordt gevoed met een sinusvormige spanning, worden in de korte spoel twee spanningen geïnduceerd die onderling 90° in fase verschillen. Uit deze spanningen kan de positie worden bepaald met een nauwkeurigheid van 2,5 μm . (Gereproduceerd met toestemming van E.M.I. Electronics Ltd, Hayes, Engeland.)

zich dus slechts een zeer beperkt aantal — van tevoren ingestelde — meetpunten binnen het gehele meetgebied. Hoewel primitief aandoend en niet zeer nauwkeurig, biedt dit systeem soms voordelen door zijn grote eenvoud. De geëffectueerde nauwkeurigheid kan nog verhoogd worden door een zg. voormeldcontact, dat voor het laatste deel van het traject een kruipgang kan bewerkstelligen. Het einde van de kruipgang wordt dan gemarkeerd door het definitieve contact of door een mechanische aanslag.

Behalve de gemaakte indeling in directe en indirecte meetmethodes, kan er nog onderscheid gemaakt worden tussen digitale en analoge systemen alsmede tussen incrementeel en abso-

Om de merites van een zeker meetsysteem voor een bepaalde machine te kunnen beoordelen, moeten de eigenlijke opnemer aan de machine en de elektrische verwerking van het meetsignaal worden beschouwd in hun samenhang met de informatieverwerking van het gehele numerieke besturingssysteem. In het algemeen kan op dit ogenblik gezegd worden dat analoge systemen vaak eenvoudiger en minder nauwkeurig zijn, terwijl de aanpassing bij het informatieverwerkende gedeelte hierbij zekere

⁶⁾ Dit systeem is toegepast in een numeriek bestuurd contour-freesbank die in het Philipslaboratorium te Eindhoven is ontwikkeld en die binnenkort uitvoerig in dit tijdschrift zal worden beschreven.

moelijkheden met zich mee kan brengen. De op zich zelf vaak meer gecompliceerde digitale meetsystemen sluiten daarentegen uitstekend aan bij de — steeds meer toegepaste — digitale informatieverwerking. Het is vaak de betrouwbaarheid van de digitale verwerking van het meetsignaal en van de informatie, die beslissend is voor de vraag of absoluut dan wel incrementeel gemeten kan worden. Verwacht mag worden dat het — veel dure elektronische componenten besparende — incrementele meten het pleit zal winnen, nu voor de betrouwbaarheid van de digitale meetsignaal- en informatieverwerking het ideaal van de „Narrensicherheit” bereikbaar schijnt te worden.

Informatieverwerking

De informatieverwerking (fig. 10) doorloopt in principe drie stadia:

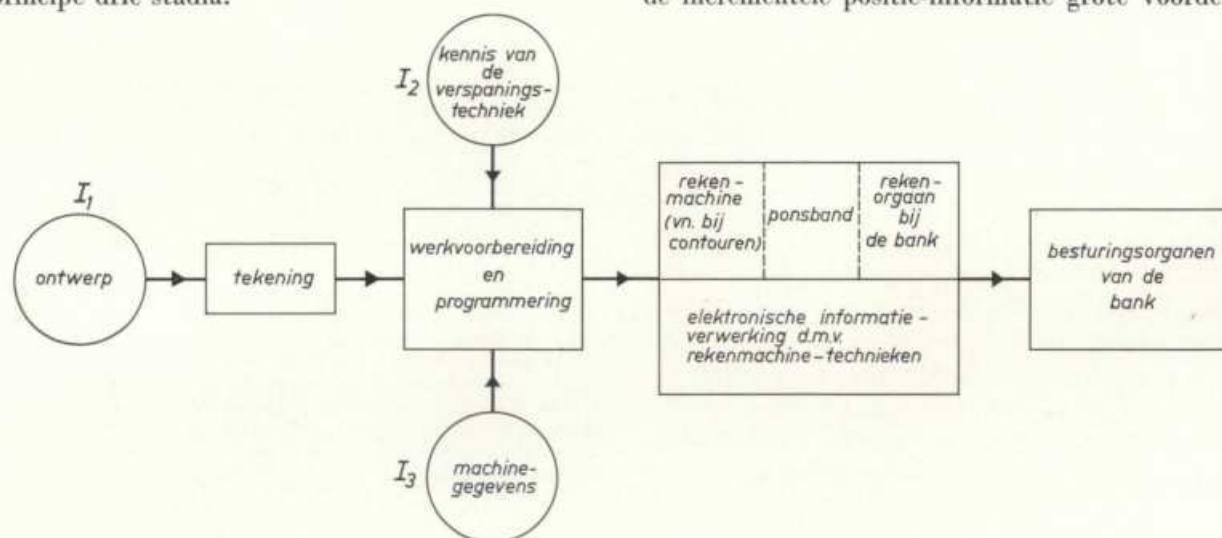


Fig. 10. Schema van de informatieverwerking bij numerieke besturing van gereedschapswerktuigen. I_1 , I_2 en I_3 zijn de informatiebronnen. De informatieoverdracht aan de bank door middel van ponsband vormt een onderbreking in het rekenproces.

- 1) van werkstuk- en machinespecificaties tot informatiedrager (b.v. ponsband),
- 2) informatieoverbrenging aan het gereedschapswerktuig,
- 3) informatieverwerking bij het gereedschapswerktuig in een rekenorgaan tot grootheden die verstaanbaar zijn voor de uitvoeringsorganen (meet- en regelsysteem).

Bij contourmachines is voor het eerste stadium een grote elektronische rekenmachine onontbeerlijk. Zulke machines kunnen doorgaans alleen in een mathematisch rekencentrum lonend werken. Zoals hierboven reeds is betoogd, is het van essentieel belang, ervoor te zorgen dat de werkvoorbereider en de programmeur op relatief eenvoudige manier de schakel kunnen vormen tussen de tekenkamer en

de werkplaats enerzijds, en het rekencentrum anderzijds. De verdere informatieverwerking in het rekencentrum levert in principe geen moeilijkheden op, daar gebruik gemaakt kan worden van bekende rekenmachinetechnieken. Van groot belang is hierbij de faze en de vorm waarin de informatie aan het gereedschapswerktuig wordt overgebracht. Deze overbrenging is te beschouwen als een noodzakelijke onderbreking in het totale rekenproces, waarvan een deel in het rekencentrum en een deel in het rekenorgaan bij de machine plaatsvindt. Wordt als informatiedrager een ponsband gebruikt, dan is het zaak de lengte van de band en de omvang van het rekenorgaan binnen redelijke grenzen te houden. Deze simpel geformuleerde eis is veeleer paradoxaal dan triviaal. Een korte ponsband impliceert nl. een omvangrijk rekenorgaan en omgekeerd! Bij nadere analyse blijkt hier de incrementele positie-informatie grote voordelen

te hebben. Enerzijds wordt hierbij de ponsbandlengte — in vergelijking met absolute positie-informatie — nagenoeg gedecimeerd, anderzijds wordt de omvang van het rekenorgaan ongeveer gehalveerd. De hieraan verbonden voordelen zijn zo groot, dat men zich moet verwonderen dat bij zo weinig contourmachines incrementele positie-informatie toegepast wordt. Als consequentie hiervan waren op recente tentoonstellingen van gereedschapswerktuigen vele voorbeelden met onhandelbare ponsbandlengten ofwel omvangrijke en zeer dure rekenorganen te bezichtigen.

Bij positioneren is de situatie geheel anders. De werkvoorbereiding is hier nl. zo simpel dat deze in wezen slechts bestaat uit het opmaken van een tabel met enige tientallen getallen: voor elke be-

werkingsfaze één getal voor de positie en één getal voor de snelheid. De eenvoudigste vorm van informatietoever is het zg. stekerpaneel, bestaande uit rijen en kolommen gaatjes waarin stekers gestoken worden. Elke kolom stelt dan bij voorbeeld één beweringsfaze voor, de ingeprikte stekers representeren de soort bewerking, de positie en de snelheid. Er bestaan talloze uitvoeringsvormen van dergelijke panelen alsmede van de bijbehorende informatieverwerking. Sommige zijn gecompliceerder dan een rekenorgaan behorende bij een contourmachine, andere daarentegen zijn zo ver vereenvoudigd dat het geheel nauwelijks meer op de benaming van numerieke besturing aanspraak kan maken. Bijna steeds treft men bij een stekerpaneel een meetsysteem met nokkenlijsten en „elektrische aanslagen” aan. De reden hiervan is duidelijk: de beperkte mogelijkheid tot informatietoever bij een stekerpaneel sluit uitstekend aan bij een dergelijk meetsysteem.

De laatste jaren komt bij het positioneren de ponsband als informatiedrager sterk naar voren in combinatie met een continu informatieleverend meetsysteem. Het laat zich aanzien dat bij grotere en duurdere gereedschapswerktuigen deze combinatie alle andere systemen spoedig geheel zal verdringen. Merkwaardigerwijze is dan zowel qua informatietoever als qua meetsysteem weer dezelfde situatie ontstaan als bij het contouren. Beide systemen groeien in technisch opzicht dus naar elkaar toe, een ontwikkeling die ook bij de aandrijving (hydraulische systemen) reeds opgemerkt is. Het

grote verschilpunt blijft uiteraard de informatieverwerking, welke bij positioneren veel eenvoudiger is. Deze eenvoud komt echter praktisch alleen in de werkvoorbereiding tot uiting. De informatieverwerking bij de bank vertoont nl. veel kleinere verschillen in elementaire rekenmachinetechniek.

Het zwaartepunt komt hier steeds meer op (relatieve) eenvoud en betrouwbaarheid te liggen. Door een algehele transistorisatie en compacte bouwwijze zijn deze eenvoud en betrouwbaarheid bereikbare idealen geworden.

Samenvatting. Hoofdzakelijke inhoud van de openbare les die de auteur heeft gegeven bij de aanvaarding van het ambt van Lector aan de Technische Hogeschool te Delft. Bij de automatisering van gereedschapswerktuigen biedt het grote voordelen de informatie in numerieke vorm aan de machine (b.v. freesbank, draaibank) toe te voeren. Zowel de nauwkeurigheid als de produktiviteit kunnen hierbij aanzienlijk groter zijn dan bij de traditionele technieken. De problemen die optreden, worden verdeeld in twee groepen, nl. die betreffende de informatieverwerking en die betreffende de meet- en regeltechniek. Voorts wordt bij de behandeling onderscheid gemaakt tussen het zg. contouren en het positioneren. Bij de informatieverwerking moeten de gegevens van het werkstuk in een vorm worden gebracht die geschikt is om de besturingsorganen van de machine te bedienen. Bij grote machines gebeurt dit voor een deel met behulp van een digitale elektronische rekenmachine. Deze levert dan een ponsband die wordt toegevoerd aan een rekenorgaan dat zich bij de machine bevindt. Dit rekenorgaan geeft de commando's aan de besturingsorganen van de machine.

Bij de bespreking van de meet- en regeltechnische aspecten blijkt dat in de meeste gevallen de hydraulische servomotor voor de aandrijving verreweg de beste resultaten geeft. Er wordt een opsomming gegeven van de vele meetsystemen die bij diverse machines zijn toegepast, waarbij de verwachting wordt uitgesproken dat bij contourmachines digitale incrementele systemen in de toekomst het meest zullen worden gebruikt, aangezien zij het best zijn aangepast aan de informatieverwerking.

KRISTALGROEI VAN SILICIUMCARBIDE

548.52:546.281'261

Bij een onderzoek omtrent de groei van siliciumcarbidekristallen ¹⁾ zijn aanwijzingen gevonden dat de beginfase van deze groei bestaat in de vorming van „whiskers” — haolvormige kristallen van soms zeer grote lengte —, opgebouwd uit SiC in de hexagonale kristalvorm (dus niet in de kubische vorm, die in latere fasen van de groei kan optreden). Deze vorming schijnt onafhankelijk te zijn van de chemische reactie waardoor het SiC ontstaat, en onafhankelijk van de temperatuur ²⁾.

De belangrijke consequenties die deze bevinding

¹⁾ W. F. Knippenberg, Philips Res. Repts., verschijnt binnenkort.

²⁾ Zie het in ¹⁾ aangehaalde artikel. Daar wordt ook een literatuuroverzicht gegeven en er worden vroeger gevonden soortgelijke verschijnselen besproken, o.a. de door K. M. Merz gevonden hexagonale SiC-whiskers.

heeft voor de opvattingen omtrent de stabiliteit van de verschillende kristalvormen van SiC, zullen elders worden besproken ¹⁾. Hier willen wij slechts enkele resultaten vermelden van een elektronenmicroscopisch onderzoek dat werd ondernomen om de genoemde groei in een zo vroeg mogelijk stadium te volgen. Dit onderzoek leek ons ook daarom van belang, omdat SiC, zijnde samengesteld uit twee relatief lichte atomen, bij de door ons gebruikte spanningen aan de elektronenmicroscop (ca. 80 kV) voor de elektronen tamelijk transparant is: dank zij dit feit konden in dit geval vrij gedetailleerde inlichtingen over de inwendige bouw van whiskers worden verkregen.

In fig. 1 is een foto met betrekkelijk geringe vergroting gereproduceerd, waarop men een reeks ver-



Fig. 1. Elektronenmicrofoto van whiskers van allerlei typen die zijn ontstaan bij de reactie van kool en kwartsand, die gedurende enige uren op 1500 °C werden verhit in een argonatmosfeer. De whiskers ontstaan in hoofdzaak op de kooldeeltjes. Ze zijn hiervan afgehaald door er een gaasje van koperdraad tegen te drukken, dat door dopen in een zeer verdunde oplossing van polyesterhars in amylacetaat enigszins plakkend was gemaakt. Indien de verhitting bij hogere temperaturen plaatsvindt, groeien de gevormde kristallen in korte tijd uit tot een zodanige lengte en dikte dat zij met het ongewapende oog kunnen worden waargenomen.

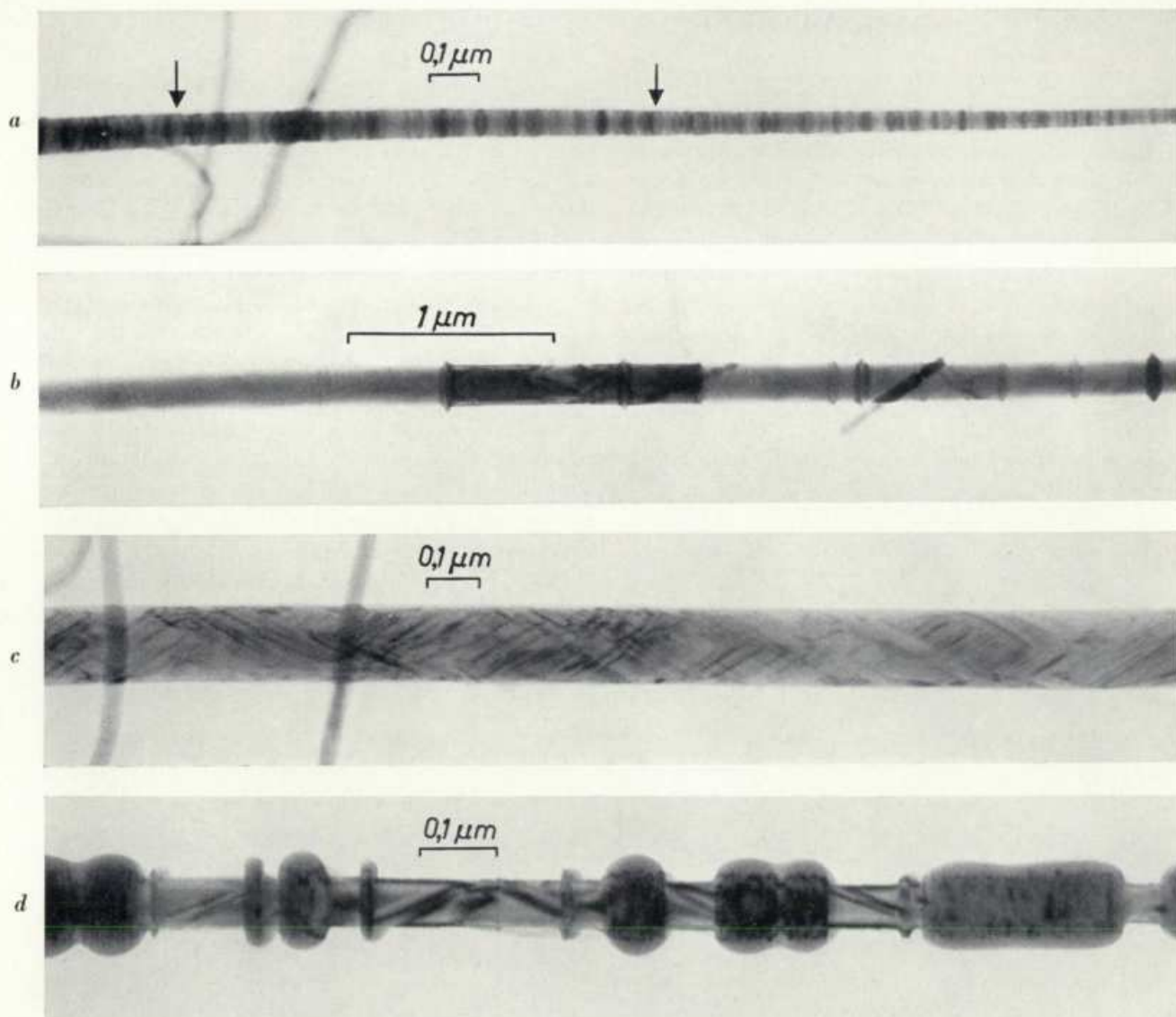


Fig. 2 a-d. Elektronenmicrofoto's van een aantal typen whiskers, die werden gevonden bij het onderzoek naar de kristalgroei van siliciumcarbide.

schillende vormen van whiskers kan onderscheiden. Het betreft hier een kristalgroei die optreedt indien men kool en kwartszand innig gemengd enige uren op 1500 °C verhit in een argonatmosfeer. Bij hogere temperaturen groeien de gevormde kristallen snel tot macroscopische grootte uit. In de foto vallen enige kristallen in de vorm van een kralensnoer op, die in verschillende afmetingen voorkomen. Interessanter dan deze vorm echter zijn sommige van de andere vormen als men ze bij sterkere vergroting bekijkt. De figuren 2 a-d tonen een viertal vormen van whiskers die geregeld gevonden worden en waarin eigenaardige details zichtbaar zijn.

Het tapse naaldvormige kristal van fig. 2a heeft blijkens stereo-opnamen een zeshoekige doorsnede. Loodrecht op de lengterichting ziet men vele zeshoekige banden (de zeshoek is heel duidelijk b.v.

bij de ingetekende pijltjes); bij nauwkeuriger beschouwing geven de banden de indruk de zijvlakken te zijn van afgeknotte zeszijdige piramides, zodat de whisker, als men hem in de lengterichting kon aftasten, niet glad doch onregelmatig getand zou aanvoelen. De verstoringen in de bouw van het kristal, die verantwoordelijk moeten zijn voor de plaatselijk veranderde wisselwerking met elektronen waardoor de banden in de foto zichtbaar worden, zouden b.v. verklaard kunnen worden als een telkens herhaalde tweelingvorming. De genoemde zeshoekige begrenzing is wel geen bewijs voor een hexagonale kristalbouw, maar zou er toch op ongedwongen manier uit voortvloeien.

De kristalvorm in fig. 2b — het afgebeelde exemplaar is ca. 5 maal zo dik als dat in fig. 2a — toont eveneens contrasterende banden, maar op veel

grotere afstanden. De lange, gladde secties tussen twee banden schijnen een volkomen regelmatige bouw te bezitten. Dit kan men vooral concluderen uit het feit dat bij draaien van het kristal in de elektronenbundel de relatieve helderheid van de verschillende secties verandert. Dat een sectie relatief donker afgebeeld wordt, is nl. aldus te begrijpen dat een schare roostervlakken in die sectie toevallig zodanig georiënteerd is dat de invallende elektronen aan de conditie van Bragg voldoen. Ze worden daardoor onder een zo grote hoek gereflecteerd dat ze door het objectiefdiafragma worden onderschept en niet tot het beeld op het scherm bijdragen. Bij draaiing van het kristal zal successievelijk telkens een andere sectie in een zodanige stand komen dat dit effect optreedt en de sectie dus donker wordt — mits de bouw van het rooster in elke sectie geheel regelmatig is.

Het kristal in fig. 2c is niet „haarvormig” maar heeft de vorm van een zeer langgerekt plaatje. Dit blijkt uit stereo-opnamen. Op de kristallen van dit type zijn twee groepen van evenwijdige banden zichtbaar, die elkaar onder een hoek van 60° snijden. Van een getande contour als in het type van fig. 2a hebben we bij deze kristallen ook bij sterkere vergrotingen nooit iets waargenomen. Om het contrast van de banden te verklaren, meenden wij eerst weer aan een Bragg-reflexie als in fig. 2b te moeten denken. In een band zou een bepaalde schare roostervlakken in reflexiestand kunnen staan, en het waargenomen beeld met de korte banden zou dan verklaard kunnen worden door een elastische torsie van het gehele kristal. Deze verklaring kan echter niet juist zijn, want bij draaiing van de whisker in de elektronenbundel blijken de banden mee te draaien (waarbij het contrast wel verandert). Ze berusten dus op een plaatselijke eigenschap van het kristal — welke, kunnen wij nog niet zeggen.

Bij de whisker in fig. 2b ziet men een geringe ver-

dikking in de banden die de gladde secties van elkaar scheiden. Deze versterkte diktegroei komt zeer duidelijk tot uiting bij de whisker in fig. 2d. De uiterlijke vorm van dit type whisker is overigens dezelfde als die men vindt bij whiskers die (bij hogere temperatuur) uitgegroeid zijn tot lengten van enkele millimeters en die men derhalve met de optische microscoop kan onderzoeken. Bij de met de optische microscoop waarneembare whiskers kan men gemakkelijk vaststellen of men met kubisch dan wel hexagonaal SiC te maken heeft, nl. door de dubbele breking die het hexagonale (niet isotrope) kristal veroorzaakt. We hebben gevonden dat in zulke whiskers kubische en hexagonale gedeelten elkaar afwisselen. De vraag ligt voor de hand of dit ook reeds bij de submicroscopische whiskers als in fig. 2d het geval is. Dit kan in principe worden onderzocht aan de hand van elektronendiffractieopnamen van de verschillende gedeelten van een whisker. We hebben zulke opnamen gemaakt, maar ze blijken niet eenvoudig interpreteerbaar te zijn.

Bij andere, met de optische microscoop waarneembare, whiskers is door andere onderzoekers in sommige gevallen vastgesteld dat in de lengteas van de whisker een centrale dislocatie aanwezig was³⁾. Men heeft wel gemeend dat men het mechanisme van de kristalgroei in de vorm van whiskers hiermee in verband moest brengen. Dank zij de goede transparantie van de hier onderzochte whiskers zouden we zulk een centrale dislocatie op onze elektronenmicrofoto's moeten kunnen waarnemen; we hebben deze echter bij geen enkele whisker kunnen ontdekken.

W. F. KNIPPENBERG *).

H. B. HAANSTRA *).

J. R. M. DEKKERS *).

³⁾ Zie b.v. D. R. Hamilton, J. appl. Phys. **31**, 112, 1960.

*) Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

EEN MULTIREFLEXIEKLYSTRON VOOR TOEPASSING IN MICROGOLFBAKENS

door B. B. van IPEREN *) en J. L. van LIDTH de JEUDE **).

621.385.623.5

Het aantal typen in de handel verkrijgbare microgolfbuizen voor 3-cm-golven bedraagt thans niet minder dan ongeveer 700. Dit betekent merkwaardig genoeg echter geenszins dat iedere ontwerper van 3-cm-apparatuur voor zijn doel wel een geschikte keus kan doen; het aantal typen dat een vermogen van ca. 10 watt levert, is b.v. bijzonder klein. In het onderstaande artikel vindt men een nieuwe 10-watts-multireflexieklystron voor 3-cm-golven beschreven, dat met 50 Hz in frequentie kan worden gemoduleerd over een frequentiegebied van meer dan 200 MHz. Het is daardoor bijzonder geschikt om als zendbuis te fungeren in scheepvaartbakens van het type ramark. Mede doordat de buis mechanisch verstelbaar is — dit eveneens in tegenstelling tot de bestaande 10-watts-buizen —, en wel over niet minder dan 8%, lijken ook andere specifieke toepassingen niet uitgesloten.

De laatste jaren onderzoekt men de mogelijkheid om ten behoeve van de zeescheepvaart op daarvoor geschikte plaatsen microgolfbakens van het type ramark in te richten. Deze bakens zouden bij de navigatie hulp kunnen bieden op een wijze die vergelijkbaar is met de wijze waarop thans des nachts en bij goed zicht de vuurtorens dat doen. Ze zijn zodanig ingericht dat op het radarscherm van alle in de buurt varende schepen een zeer nauwe, met heldere rechte lijnen gevulde, sector verschijnt (tophoek gelijk aan de bundelhoek van de antenne van de radarontvanger op het schip, dus b.v. ca. 2°) die in de richting van de plaats van het baken loopt. Zogoed als het licht van een vuurtoren voor een schip niet continu zichtbaar is maar een zeker „karakter” heeft — b.v. iedere tien seconden twee schitteringen met een tussentijd van één seconde —, zo wordt ook ieder baken volgens een bepaald programma periodiek in- en uitgeschakeld, waardoor het herkenbaar is ¹⁾.

Ten einde te bereiken dat de radarontvanger van ieder schip het baken opmerkt (de radarzender van het schip heeft in dit geval geen functie), moet het baken alle frequenties binnen de civiele radarband (9320 MHz tot 9500 MHz) uitzenden. In principe is dit het eenvoudigst te realiseren door de bakenzender af te stemmen op ongeveer 9400 MHz (golflengte ca. 3,2 cm) en hem met een zwaai van ca. 100 MHz in frequentie te moduleren ²⁾.

Als modulatiefrequentie kiest men ca. 50 Hz: in de tijd waarin de bundel van de roterende radarantenne van een schip het baken éénmaal passeert, wordt dan de hele frequentieband ten minste éénmaal doorlopen. Ieder schip kan dus bij iedere omwenteling van zijn radarantenne een signaal van het baken opvangen. (Hierbij is weer gerekend met een bundelhoek van ca. 2° , en met een antenne die ronddraait in ca. 2 seconden.) Om diverse redenen is het nodig bovendien nog een frequentiemodulatie aan te brengen met een zwaai van 10 à 15 MHz en een modulatiefrequentie van ca. 10^4 Hz.

Aan de bovengenoemde eis van moduleerbaarheid in frequentie in een gebied van ca. 200 MHz kan bij het hier vereiste vermogen van ca. 10 watt niet worden voldaan met een zendbuis van een der bestaande types. De in dit artikel te beschrijven buis, een multireflexieklystron, is dan ook speciaal ontwikkeld voor gebruik in ramarkbakens van het zожuist beschreven soort. Het principe van de werking verschilt aanmerkelijk van dat van de vroeger in dit tijdschrift beschreven multireflexieklystrons voor 12 cm en $8\frac{1}{2}$ cm golflengte ³⁾. Hierdoor was het mogelijk ondanks de veel kleinere golflengte het hoge rendement van de genoemde buizen nagenoeg te evenaren, nl. 15 tot 20%, bij 9 tot 12 watt. Met een normaal klystron bereikt men in dit gebied van golflengten en vermogens slechts een rendement van 5 tot 7%.

De constructie van de nieuwe buis is eenvoudig, hetgeen, mede door gebruik van een glazen ballon, de produktiekosten relatief laag maakt.

*) Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

**) Destijds Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

¹⁾ Een beschrijving van het principe van een ramarkbaken vindt men in: „The use of radar at sea” (Red. F. J. Wylie), Hollis and Carter, Londen 1952. De naam „ramark” is een verkorte vorm van de uitdrukking: „MARK obtained by RADIO means”.

²⁾ Zie voor een uitvoeriger beschrijving van dit type ramarkbaken: J. M. F. A. van Dijk, N. Schimmel en E. Gold-bohm, A ramark beacon for use with marine radars, Int. conf. on lighthouses and other aids to navigation, Scheveningen 1955.

³⁾ De buizen voor 12 en $8\frac{1}{2}$ cm golflengte vindt men resp. beschreven in F. Coeterier, Philips techn. T. 8, 257, 1946 en 17, 293, 1955. De ontwikkeling van de nieuwe buis is eveneens begonnen onder leiding van F. Coeterier, die tot 1959 in Philips' Natuurkundig Laboratorium werkzaam is geweest. Zie: F. Coeterier, Tubes à réflexions multiples, L'onde électrique 36, 917-919, 1956.

Verder bleek het mogelijk de buis, met behoud van de eenvoudige constructie, zodanig te ontwerpen, dat hij mechanisch verstembaar is — ook dit is bij de bestaande 10-watts-buizen niet mogelijk —, en wel over een gebied van ongeveer 8%; hierdoor is de buis ook geschikt voor andere toepassingen.

Het in frequentie moduleren van de draaggolf met een frequentie van ca. 10^4 Hz en een zwaai van 10 à 15 MHz is noodzakelijk om redenen die samenhangen met de wijze waarop de ontvanger van een scheepsradarinstallatie is ingericht. In zo'n ontvanger wordt het ontvangen echosignaal, dat bestaat uit impulsen van b.v. $1\ \mu\text{s}$ breedte met een tussentijd van b.v. $999\ \mu\text{s}$ (impulsherhalingsfrequentie dus 1000 Hz), gedetecteerd, d.w.z. dit signaal wordt omgezet van een reeks golfreintjes in een overeenkomstige reeks blokjes. Het aldus verkregen signaal wordt versterkt door de videoversterker en toegevoerd aan de katodestraalbuis. De videoversterker behoeft dus geen frequenties door te laten lager dan de impulsherhalingsfrequentie.

Het signaal van een ramarkbaken dat niet voorzien zou zijn van de frequentiemodulatie van 10^4 Hz zou in de ontvanger na detectie resulteren in een blokjessignaal met een herhalingsfrequentie van 100 Hz. Door de 50-Hz-modulatie passeert de frequentie van de zender immers 100 maal per seconde de smalle frequentieband waarin de ontvanger gevoelig is. Een signaal van zo lage frequentie wordt door de videoversterker echter niet doorgelaten, zoals we zagen. Is wel een 10^4 -Hz-modulatie aanwezig, met een zodanige zwaai dat de bakenfrequentie bij het passeren van de band van de ontvanger daar inderdaad 10^4 maal per seconde „in”- en „uitloopt”, dan krijgt men in plaats van de genoemde 100-Hz-blokjes, daarmee overeenkomende groepen van 10 000-Hz-blokjes. Deze worden door de videoversterker wel doorgelaten en geven op het panoramascherm het aanzijn aan een streeplijn die van het centrum in de richting van het baken naar de rand van het scherm loopt. Het aantal streepjes waaruit deze lijn bestaat, neemt uiteraard toe met de modulatiefrequentie. Het is daarom goed voor de modulatiefrequentie een waarde te kiezen die flink wat groter is dan de impulsherhalingsfrequentie.

Anderzijds kiest men deze frequentie liefst niet hoger dan $1\ \text{à}\ 2 \times 10^5$ Hz omdat anders een voor de praktijk zeer belangrijke eigenschap van het type ramarkbaken dat we hier op het oog hebben ²⁾, verloren zou gaan. We doelen hier op de mogelijkheid om op het schip het signaal van het baken te elimineren (althans sterk te verzwakken) met behulp van de zg. F.T.C.-schakeling, die in vele radarinstallaties aanwezig is ter onderdrukking van hinderlijke reflexies van regendruppels. Met name kan dit wenselijk zijn wanneer het schip dicht langs het baken vaart. Door de F.T.C.-schakeling in werking te stellen, vergroot men in feite de onderste afsnijfrequentie van de videoversterker tot een waarde van b.v. 10^5 Hz.

De werking van de buis

Principe

Ten einde duidelijk in het licht te stellen waarin het nieuwe multireflexieklystron voor 3-cm-golven verschilt van die voor grotere golflengte, recapituleren we even kort de werking van een reflexie- en van een multireflexieklystron. In ieder klystron

passeert een elektronenbundel twee dichtbij elkaar geplaatste roosters *M* (zie fig. 1a) waartussen een hoogfrequente wisselspanning staat. Dit leidt tot een snelheidsmodulatie van de elektronen en daarvoor, een eindweegs verder, tot een dichtheidsmodulatie van de bundel: later langs *M* passerende elektronen, die versneld worden, halen vroegere, die vertraagd waren, in. In een op de beide roosters *I* aangesloten keten kan op deze wijze een wisselstroom geïnduceerd worden. De frequentie van deze wisselstroom is gelijk aan die van de spanning op de roosters *M*.

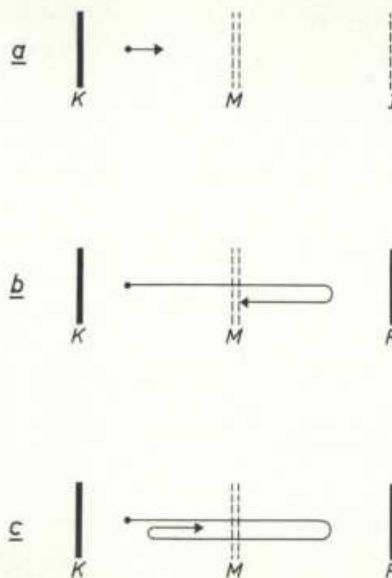


Fig. 1. a) Principe van de werking van een klystron. *K* katode, *M* modulatiestroosters, waartussen de elektronen in snelheid worden gemoduleerd. In de veldvrije ruimte tussen *M* en *I* ontstaat door de snelheidsmodulatie een dichtheidsmodulatie. De elektronen passeren de roosters *I* dus in „pakketten” en induceren daardoor in *I* een wisselstroom. b) Principe van reflexieklystron. De functies van *M* en *I* worden vervuld door één paar elektrodes. Doordat er rechts van *M* een remveld is, dat gerealiseerd wordt met behulp van de reflectorelektrode *R*, keren de elektronen terug. c) Principe van multireflexieklystron. Hier worden de elektronen ook in de katoderuimte gereflecteerd en gaan aldus enige malen heen en weer alvorens verloren te gaan.

In een reflexieklystron (fig. 1b) worden *M* en *I* gevormd door hetzelfde paar elektrodes. De elektronen komen hier, na *M* gepasseerd te zijn, in een remveld en keren terug. Op de terugweg induceren de inmiddels gevormde „pakketten” van elektronen een wisselstroom in *M*, zoals ze dat in fig. 1a in *I* deden. Daar *M* hier niet wordt gevormd door een paar roosters maar meestal door een spleet in de wand van een trillholte, noemen we *M* voortaan interactieruimte of kortweg spleet. De frequentie is hier vrijwel gelijk aan de resonantiefrequentie van de trillholte.

In een multi-reflexieklystron (fig. 1c) wordt een deel van de terugkerende elektronen in het veld

tussen M en de katode K opnieuw gereflecteerd; deze gaan daarna in de figuur dus weer naar rechts, en passeren opnieuw de spleet. Indien men alle grootheden geschikt kiest, kan op deze wijze een elektron enige malen heen en weer gaan en een flink deel van zijn energie aan M afgeven. Uiteraard moet er daarbij voor gezorgd worden dat ieder pakket de spleet passeert op een ogenblik waarop het elektrische veld de elektronen afremt. In multireflexieklystrons is het noodzakelijk de elektronenbundel bijeen te houden met behulp van een longitudinaal magneetveld. Men realiseert dit gewoonlijk met behulp van een permanente magneet.

Bij het zoeken naar een geschikte vorm voor het elektrostatische remveld in de buis stuit men op tegenstrijdige eisen. Enerzijds wenst men dat de elektronen die op zeker ogenblik M als groep passeren, ook weer een groep vormen als ze terugkomen. (Wat ze buiten M doen, doet er niet toe.) Dit betekent dat de tijd na welke ze terugkomen, de zg. looptijd, voor alle dezelfde moet zijn: de looptijd mag dus niet afhangen van de snelheid waarmee de elektronen M passeerden. Aan deze eis wordt voldaan als de potentiaal parabolisch verloopt en bovendien M zich ter plaatse van het maximum bevindt.

Anderzijds verlangen we dat een door M teweeggebrachte snelheidsmodulatie, in de gereflecteerde bundel leidt tot een ter plaatse van M optredende dichtheidsmodulatie. Dit vereist uiteraard een variabele looptijd.

In de buizen voor 12 en $8\frac{1}{2}$ cm golflengte is dit probleem opgelost op de wijze die in fig. 2a geschetst is. Rechts van de interactieruimte M is de remruimte groter dan links. In het extradeel, rechts van R , wijkt het potentiaalverloop af van het parabolische. Het geheel is zo gedimensioneerd dat elektronen die bij hun eerste passage door M vertraagd worden, het punt R in 't geheel niet bereiken; die welke daarbij versneld worden doen dat wel en brengen in de ruimte rechts van R , de „wachtkamer”, een zodanige tijd door dat ze de terugreis maken samen met elektronen die in de volgende halve periode in M vertraagd werden. Ze worden dan in M vervolgens óók vertraagd uiteraard, en bereiken nadien de wachtkamer nooit meer: het eenmaal gevormde pakket blijft bestaan.

In de praktijk benadert men het parabolische potentiaalverloop door een veldvrije ruimte (potentiaal dus constant) te flankeren door twee ruimten met lineair verlopemde potentiaal (constante veldsterkte). Ook de „wachtkamer” bestaat uit een veldvrij deel en een deel met lineair verlopemde potentiaal; zie fig. 2b. Voor het realiseren van dit

potentiaalverloop zijn er dus ten minste twee reflectorelektrodes nodig: een doorboorde bij R en meer naar rechts in de figuur een tweede, die massief kan zijn.

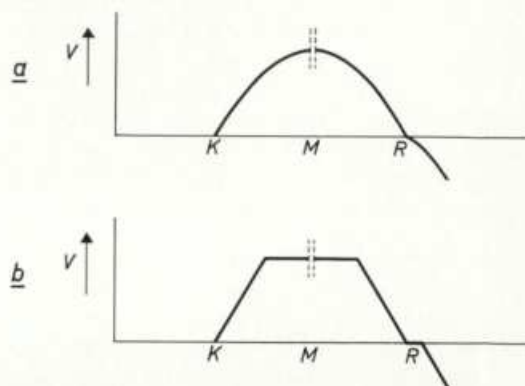


Fig. 2. a) De tegenstrijdigheid tussen de eis van constante looptijd en de eis van pakketvorming kan in multireflexieklystrons voor golflengten van ca. 10 cm worden opgelost door het geschetste veldverloop te kiezen. Tussen K en R is het verloop van de potentiaal V parabolisch — een parabolisch potentiaalverloop voldoet exact aan de eerste eis — maar rechts van R wijkt het van de paraboelvorm af. Het punt R wordt alleen bereikt door de elektronen die bij hun eerste passage door M versneld werden. Deze verblijven in de ruimte rechts van R , de „wachtkamer”, juist een halve periode en maken de terugreis samen met de elektronen die M een halve periode later passeerden en daar dus vertraagd werden. Het aldus gevormde pakket passeert M nu steeds in de vertragende halve periode en blijft bijeen omdat het R niet meer bereiken kan.

b) In de praktijk benadert men het in a) geschetste potentiaalverloop door een combinatie van veldvrije ruimten en ruimten met lineair verlopemde potentiaal.

Daar het niet mogelijk is een volgens het wachtkamerprincipe werkende buis voor 3-cm-golven te construeren door eenvoudig de afmetingen van een buis voor $8\frac{1}{2}$ -cm-golven te verkleinen, is voor de nieuwe buis een andere oplossing gekozen. Men vindt het principe daarvan geschetst in fig. 3. Ook hier is, terwille van de versnelde elektronen, de rechtse remruimte groter, maar het potentiaalverloop blijft parabolisch. De vereiste dichtheidsmodulatie wordt hier verkregen door met drie interactieruimten te werken; één daarvan staat weer in de as van de parabool, maar de twee andere staan daar buiten en wel symmetrisch ter weerszijden. Door hun plaatsing voldoen de laatstgenoemde twee spleten niet aan de hierboven genoemde eis voor het ver-

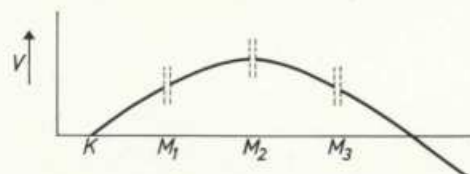


Fig. 3. In het nieuwe multireflexieklystron, voor 3-cm-golven, wordt de pakketvorming niet teweeggebracht door het potentiaalverloop van de paraboelvorm te doen afwijken maar door te werken met drie interactieruimten M_1 , M_2 en M_3 , waarvan er twee buiten het symmetrievlak van V staan.

krijgen van een constante looptijd: de snelheidsverandering die een elektron in een der buiten de as geplaatste interactieruimten ondergaat, resulteert voor de desbetreffende halve slingering wel in een verandering van de looptijd en leidt dus inderdaad tot pakketvorming ⁴⁾.

In de volgende paragraaf zullen we dit alles kwantitatief beschouwen. Hier vermelden we nog dat de drie interactiespleten deel uitmaken van drie onderling sterk gekoppelde trilholten — in iedere holte één spleet — die zodanig trillen dat de spanningen op M_1 en M_3 onderling in fase zijn en in tegenfase met die op M_2 . Alle drie de spleten bevinden zich in de veldvrije ruimte door welke ook hier het middenstuk van het vereiste veld benaderd wordt (fig. 4).

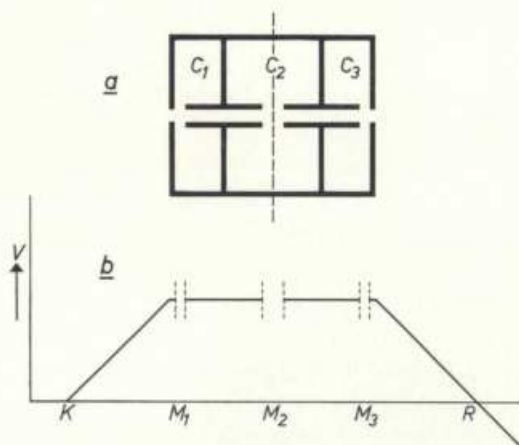


Fig. 4a) De resonator bestaat uit drie sterk gekoppelde trilholten C_1 t/m C_3 die ieder een der drie interactiespleten M bevatten.

b) Het potentiaalverloop. De drie interactiespleten M_1 t/m M_3 bevinden zich in een centrale veldvrije ruimte. Deze wordt geflankeerd door remruimten met lineair verlopende potentiaal. Deze vorm van het potentiaalverloop fungeert weer als benadering van de parabolische.

De reden waarom men een volgens het „wachtkamerprincipe” werkende buis niet sterk kan verkleinen, is, dat dit te hoge eisen zou stellen aan de katode. Zou men de eerder beschreven buis voor $8\frac{1}{2}$ cm evenredig verkleinen tot een voor 3,2 cm, dan zou de stroomdichtheid aan de katode ca. $7 \times$ zo groot moeten worden, d.w.z. ca. 14 A/cm^2 . Deze eis is nog aanmerkelijk zwaarder dan in dit getal tot uitdrukking komt, aangezien de katode van de multireflexiebuis blootstaat aan een zwaar ionenbombardement — doordat de elektronen vele malen heen en weer gaan, veroorzaken ze, precies als in een manometer volgens Penning, een relatief sterke ionisatie.

Een katode die onder deze omstandigheden de genoemde stroomdichtheid levert, is niet beschikbaar, althans niet wanneer men tevens een lange levensduur eist. Bij het verkleinen van de buis is men dus genoodzaakt de katode relatief te vergroten, hetgeen impliceert dat dit ook met de openingen in de elektrodes en de resonator moet gebeuren. Het is dan echter niet goed meer mogelijk het in de „wachtkamer” vereiste veld te realiseren. De scherpe knik in het veld die voor een wachtkamer vereist is, treft men nl. alleen aan bij de rand van het gat in de elektrode. In het midden van het gat wordt dit verloop des te beter benaderd naarmate het gat kleiner is. In een relatief groot gat heeft het veld in het grootste deel van de opening een vloeiend verloop.

Uiterlijk lijkt de elektrodeconfiguratie van de nieuwe buis toch meer op die van de oude dan fig. 4b zou doen vermoeden. Ook hier zijn er twee reflector-elektrodes. De binnenste daarvan dient er nu echter voor om het zg. „doorzakken” van het veld ten gevolge van ruimtelading te elimineren, d.w.z. om de lineariteit van het remveld ondanks de ruimtelading ongeveer te handhaven. Zonder deze maatregel zou een aanmerkelijke vervorming van het remveld plaatsvinden, die de werking van de buis ongunstig beïnvloedt. Het verschil in functie ten opzichte van de binnenste reflectorelektrode van de buis voor golven van $8\frac{1}{2}$ cm blijkt direct uit de aangelegde spanning. In de $8\frac{1}{2}$ -cm-buis heeft de bedoelde elektrode de potentiaal van de katode, hier heeft hij een aanmerkelijk hogere potentiaal.

Nadere beschouwing van de beweging der elektronen

We zullen thans uiteenzetten hoe men het gedrag van de elektronenbundel kan nagaan, en voor de nieuwe buis de ter plaatse van M_2 in de bundel aanwezige wisselstroomcomponent berekenen. We gaan hierbij uit van de veronderstelling dat de wisselspanning over de spleten klein is ten opzichte van het potentiaalverschil V_0 dat de elektronen doorlopen hebben, alvorens de veldvrije ruimte binnen te gaan waarin zich de spleten bevinden. De snelheidsverandering die ze in de spleten ondergaan, is dus relatief klein.

In een elektronenbundel die bij M (fig. 1) in snelheid wordt gemoduleerd door een roosterpaar waarop de spanning $U e^{j\omega t}$ staat, is bij I een wisselstroomcomponent $i_{\sim}$ aanwezig die gegeven wordt door de formule:

$$i_{\sim} = \frac{1}{2} j G_0 \varphi_D U e^{-j\varphi_D + j\omega t} \quad (1)$$

Hierin is G_0 gelijk aan de gelijkstroomcomponent I_0 gedeeld door V_0 , en φ_D is ω maal de tijd die een

⁴⁾ Zie ook het laatste der in ³⁾ aangehaalde artikelen van Coetier.

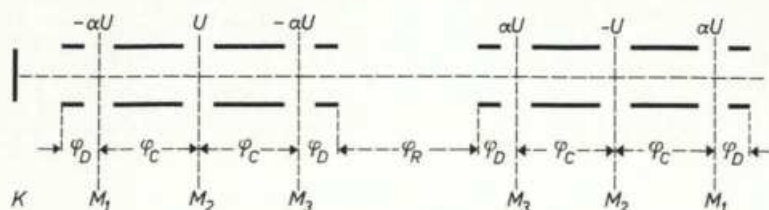


Fig. 5. Ter berekening van de wisselstroomcomponent ter plaatse van M_2 in een elektronenbundel in de nieuwe buis. De figuur heeft betrekking op een bundel die, van de katode gekomen, de drie interactieruimten éénmaal gepasseerd is, en vervolgens na één reflexie naar M_2 teruggekeerd is. De remruimte wordt gerepresenteerd door een equivalente veldvrije ruimte met looptijd φ_R . De grootheden φ_C en φ_D zijn de looptijden in de (werkelijk) veldvrije ruimten tussen resp. naast de spleten. De spanningen op de spleten M_1 en M_2 zijn in tegenfase met die op M_2 en hebben een andere amplitude.

niet-versneld elektron nodig heeft om de afstand MI af te leggen ⁵⁾.

Laat men de elektronen die M gepasseerd zijn, niet bewegen in een veldvrije ruimte maar in een remveld met een lineair potentiaalverloop, zodat ze naar M terugkeren, dan vinden we voor de wisselstroomcomponent die ter plaatse van M in de terugkerende bundel optreedt:

$$i_{\sim} = -\frac{1}{2} j G_0 \varphi_R U e^{-j\omega_R + j\omega t} \quad (2)$$

Afgezien van het minteken en van de vervanging van φ_D door φ_R , de overeenkomstige grootheid voor de reflectorruimte, is deze formule identiek met (1). (De tekenomkering ontstaat doordat in een remruimte met lineair verlopende potentiaal de langzame elektronen een kleinere looptijd hebben dan de snelle, terwijl in de veldvrije ruimte het omgekeerde het geval is.) We mogen dus in de berekening zo'n remruimte vervangen denken door een veldvrije ruimte met dezelfde gemiddelde looptijd, mits wij het teken van de snelheidsmodulatie omkeren (rekenregel 1).

Passen we dit toe op een buis waarin het elektron achtereenvolgens een aantal veldvrije ruimten doorloopt, gescheiden door ruimten met een lineair verlopende potentiaal, dan geldt daarvoor:

$$i_{\sim} = \frac{1}{2} j G_0 U \left(\sum_n \varphi_{D,n} - \sum_m \varphi_{R,m} \right) e^{-(\sum_n \varphi_{D,n} + \sum_m \varphi_{R,m}) + j\omega t} \quad (3)$$

Hierin geldt $\varphi_{D,n}$ voor de veldvrije ruimte met rangnummer n en $\varphi_{R,m}$ voor het remveld met rangnummer m . In de exponent staat tussen haakjes de som van $\sum \varphi_D$ en $\sum \varphi_R$, d.i. ω maal de totale tijd waarin

het geheel doorlopen wordt; vóór de exponentiële functie staat het verschil van $\sum \varphi_D$ en $\sum \varphi_R$, ten gevolge van het in (2) optredende minteken.

Ten einde het gedrag van de elektronenbundel in de nieuwe buis te kunnen nagaan, moeten we ook het geval in aanmerking nemen dat er méér dan één stel modulatiestroosters is. De frequentie van de spanning op deze roosters is gelijk, maar de amplitude en fase verschilt in het algemeen. Daar de amplitudes klein zijn

ten opzichte van V_0 , mag men, naar aangegevoerd kan worden, bij de berekening van de resulterende wisselstroomcomponent eenvoudig de som nemen van de wisselstromen die ieder roosterpaar — i.e. iedere interactiespleet — afzonderlijk zou veroorzaken (rekenregel 2; het zg. superpositieprincipe).

Met behulp van de beide hierboven geformuleerde rekenregels kan men gemakkelijk ter plaatse van de middenspleet de wisselstroomcomponent berekenen van een elektronenstroom die in de nieuwe buis, komend van de katode, de drie spleten gepasseerd is, en na reflexie in de reflectorruimte, op de terugweg nogmaals de spleten gepasseerd is. Men moet er daarbij alleen nog op letten — dit is de derde rekenregel — dat voor de teruggaande elektronen het teken van de spleetspanning moet worden omgekeerd (fig. 5). Men vindt deze berekening in het gedeelte in kleine letters aan het eind van dit deel van het artikel.

Een aanschouwelijke voorstelling van de beweging van de elektronen vindt men in het diagram van fig. 6. Horizontaal is deze figuur gelijkwaardig met fig. 5. Van links naar rechts ziet men zo weer de katoderuimte, vier veldvrije ruimten, gescheiden door de drie spleten M_1 , M_2 , M_3 enz. Daar de remruimte (vgl. fig. 5) is voorgesteld door een equivalente veldvrije ruimte, kan men de gehele horizontale as als plaats-as van het elektron opvatten: als maat voor alle afstanden is gekozen de tijd die een denkbeeldig ongestoord elektron nodig zou hebben om ze te doorlopen. Als eenheid van tijd is de trillingstijd T van de spleetspanning gekozen ($T = 2\pi/\omega$). Verticaal is uitgezet het verschil Δt tussen de tijd waarop een zeker elektron een bepaald punt bereikt en die waarop een op $t = 0$ vertrokken ongestoord elektron dat zou hebben gedaan. De ordinaat is dus voor een ongestoord elektron constant en gelijk aan de vertrektijd; het gedrag van zo'n elektron wordt in het diagram voorge-

⁵⁾ Men vindt deze formule — althans een formule waarvan de onderhavige een vereenvoudigde versie is — afgeleid in allerlei boeken over klystrons zoals b.v. A. E. Harrison, *Klystron tubes*, McGraw-Hill, New York 1947 (Hfdst. 3), of D. R. Hamilton, J. K. Knipp en J. B. Horner Kuper, *Klystrons and microwave triodes*, McGraw-Hill, New York 1948 (Hfdst. 9).

steld door een horizontale rechte. Voor een elektron met grotere (maar constante) snelheid vindt men in de veldvrije ruimten een dalende, voor een langzamer elektron een stijgende rechte; in de katode- en de reflectorruimte geldt het omgekeerde. Deze ruimten mogen immers slechts als equivalente veldvrije ruimten beschouwd worden als men het teken van de modulatie omdraait (rekenregel 1).

Doordat de verticale as een tijd-as is, kan men de spleetspanningen die diverse na elkaar vertrekkende elektronen ontmoeten, gemakkelijk in de figuur afleiden uit de ter plaatse van iedere spleet om de verticaal getekende sinuslijn. Daar het hier

van de reflector- en de katoderuimte wordt de helling van iedere lijn volgens rekenregel 1 van teken omgekeerd.

Men kan uit het diagram afleiden dat het gedrag van de elektronenbundel in drie opzichten zeer gunstig is voor de werking van de buis. In de eerste plaats zien we dat bij iedere spleet de meeste elektronen passeren in de vertragende fase van het veld, zodat dus bij iedere spleet energie door de bundel wordt afgegeven. Verder zien we dat na één volledige slingering (rechts in de figuur bij K dus) de lijnen vrijwel weer op hun aanvangshoogte zijn, d.w.z. dat voor alle elektronen de looptijd voor een

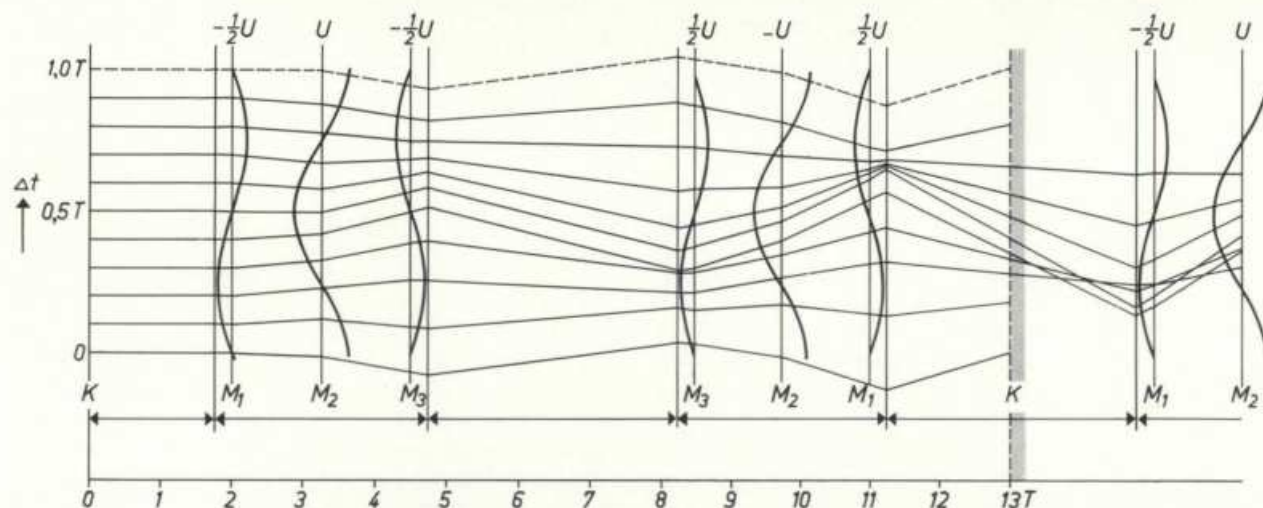


Fig. 6. Looptijd-diagram van tien elektronen die van de katode K vertrekken binnen één trillingstijd T van de spleetspanning. Wat de horizontale as betreft, is deze figuur gelijk aan fig. 5. De „afstanden” tussen de elektrodes en spleten zijn weer de tijden φ die een denkbeeldig ongestoord elektron nodig zou hebben om ze te doorlopen. Verticaal is uitgezet het verschil tussen het tijdstip waarop een zeker elektron een bepaald punt bereikt en dat waarop het genoemde denkbeeldige ongestoorde elektron dit gedaan zou hebben. Langs de verticalen die de drie

spleten M_1 t/m M_2 representeren, is de spanning getekend die de elektronen ontmoeten op het ogenblik dat ze passeren.

Van de tien elektronen blijken na één volledige slingering er zeven vertraagd te zijn en bovendien een groep te vormen die bij de volgende slingering M_2 juist in de goede fase van het veld passeert; zie het deel van de figuur rechts van de schaduwlijn. Slechts drie zijn er versneld en vallen weer op de katode. De looptijd tussen de spleten is $1,25 T$, die in de veldvrije ruimten daarbuiten $0,25 T$ en die in de reflectorruimte $3,5 T$.

de waarden betreft die een zelfde elektron op zijn reis ontmoet, zijn b.v. de spanningen op de buitenste spleten in tegenfase getekend („afstand” immers $2\frac{1}{2} T$) hoewel ze in fase trillen.

Men vindt in fig. 6 het gedrag weergegeven van tien elektronen die binnen één periode met gelijke tussentijden vertrekken, en wel voor het geval dat de amplitude U van de spanning op de middenspleet $0,1V_0$ is en die op de twee andere de helft hiervan. Blijkens door ons uitgevoerde metingen van U komt deze keus ongeveer overeen met de in de buis optredende situatie; U is ca. 380 volt — hetgeen, door de eindige spleetbreedte, effectief neerkomt op ca. 270 V — terwijl $V_0 = 3000$ V is. Bij het passeren van iedere spleet verandert de snelheid van de elektronen en daarmee de helling van de desbetreffende lijn. Bij het binnentreden en verlaten

volledige slingering ongeveer dezelfde is, en wel gelijk aan die van een ongestoord elektron. Ten slotte blijkt dat na een volledige slingering niet minder dan zeven van de tien elektronen een verdichting gevormd hebben die binnen een halve periode een gegeven punt passeert, en dat alle elektronen uit deze groep een snelheid hebben gekregen kleiner dan die van een ongestoord elektron. Deze elektronen kunnen dus niet meer de katode bereiken en blijven heen en weer slingeren tussen katode en reflector, waarbij ze voortdurend de middenspleet in de juiste fase van het veld passeren. Het begin hiervan vindt men in fig. 6 voorgesteld in het gedeelte rechts van de schaduwrand.

Bij de eerste slingeringen wordt aan de zijdspleten betrekkelijk weinig energie afgegeven daar de afstand van de zijdspleten tot de middenspleet door-

lopen wordt in $1\frac{1}{4}$ periode. Naarmate de elektronen meer energie verliezen, d.w.z. langzamer worden, wordt deze looptijd uiteraard groter, zodat een reeds vertraagd elektronenpakket bij iedere doorgang aan alle spleten energie afgeeft.

De drie elektronen die na de eerste slingingen buiten het elektronenpakket terecht komen, zijn, blijkens de figuur, juist degenen die een te grote snelheid gekregen hebben en dus weer in de katode verdwijnen: de groep die een aantal slingeren kan uitvoeren, bestaat blijkbaar uitsluitend uit „gunstige” elektronen.

De versnelde elektronen geven aanleiding tot de zg. terugverhitting van de katode, waardoor deze bij oscilleren van de buis in temperatuur stijgt.

De wisselstroom $i_{\sim}$ die in de elektronenbundel optreedt bij de middenspleet M_2 , nadat de bundel eenmaal de reflectorruimte gepasseerd is, wordt als volgt berekend. We laten de steeds optredende factor $e^{j\omega t}$ weg en schrijven dus voor de spanning op de middenspleet U . Die op de andere twee spleten is dan $-aU$, waarbij a voorlopig willekeurig positief is. De remruimte denken we ons op de beschreven wijze vervangen door een equivalente veldvrije ruimte (fig. 5). Voor de tweede doorgang zijn de spleetspanningen dan dus van teken omgekeerd, terwijl voor het berekenen van de amplitude van $i_{\sim}$ de looptijd φ_R negatief moet worden gerekend. Berekent men met behulp van fig. 5 en formule (3) de bijdrage van iedere spleet, dan vindt men onmiddellijk de gevraagde stroom:

$$i_{\sim} = \frac{1}{2} j G_0 U [-(3\varphi_C + 2\varphi_D - \varphi_R)a e^{-j(3\varphi_C + 2\varphi_D + \varphi_R)} + (2\varphi_C + 2\varphi_D - \varphi_R)e^{-j(2\varphi_C + 2\varphi_D + \varphi_R)} - (\varphi_C + 2\varphi_D - \varphi_R)a e^{-j(\varphi_C + 2\varphi_D + \varphi_R)} + \varphi_C a e^{-j\varphi_C}] \quad (5)$$

Wij trachten nu de verschillende looptijden zo gunstig mogelijk te kiezen. In de eerste plaats merken we hiertoe op dat een eenmaal gevormd elektronenpakket voortdurend in gunstige fase (d.w.z. in een afremmend veld) de middenspleet moet passeren. Hiervoor is nodig dat de looptijd van de middenspleet via de remruimte terug naar de middenspleet $(n + \frac{1}{2})$ perioden is, waarbij n een geheel getal is. De eerste voorwaarde luidt dus:

$$2\varphi_C + 2\varphi_D + \varphi_R = (n + \frac{1}{2}) 2\pi \quad (6)$$

Substitutie hiervan in (5) geeft:

$$i_{\sim} = + \frac{1}{2} j G_0 U [(4\varphi_C + 2\varphi_D - \varphi_R)a e^{-j\varphi_C} - (2\varphi_C + 2\varphi_D - \varphi_R) + (\varphi_C + 2\varphi_D - \varphi_R)a e^{j\varphi_C}] \quad (7)$$

De energieafgifte door de bundel aan de resonator wordt bepaald door het reële deel van $i_{\sim}$:

$$\text{Re}(i_{\sim}) = \frac{3}{2} G_0 U a \varphi_C \sin \varphi_C$$

Deze grootte is ongeveer maximaal als $\sin \varphi_C$ maximaal is, zodat we als tweede voorwaarde vinden:

$$\varphi_C = (m + \frac{1}{2}) 2\pi \quad (8)$$

Bij deze keuze van φ_C blijkt bovendien dat bij alle spleten het reële deel van de wisselstroom in de bundel in tegenfase met

de spleetspanning is, zodat de bundel bij elke passage energie aan de resonator afgeeft.

Ten slotte is er nog een derde voorwaarde: we moeten ervoor zorgen dat de slingertijd onafhankelijk is van de elektronensnelheid. Uit fig. 5 zou men kunnen afleiden dat hiervoor $\varphi_R = 2(\varphi_C + \varphi_D)$ moet zijn. De formules (1) en (2) waaruit we concludeerden dat de reflectorruimte mag worden vervangen door een equivalente veldvrije ruimte, gelden echter alleen voor relatief kleine snelheidsvariëaties. De uit fig. 5 afgeleide gelijkheid is dan ook alleen geldig voor de eerste reflexie, maar niet voor de laatste reflexies die een elektron ondergaat, alvorens op de resonator te vallen. Zijn energie is dan afgenomen tot gemiddeld ca. 70% van de beginwaarde en zijn snelheid v dus ruwweg tot 85% van de beginwaarde v_0 . Men moet dus de omstandigheden zoeken onder welke de slingertijd zo goed mogelijk constant is voor elektronensnelheden tussen v_0 en $0,85v_0$. Nu is de exacte uitdrukking voor de met ω vermenigvuldigde looptijd van een elektron van middenspleet via remveld terug naar middenspleet:

$$\omega\tau = \frac{v}{v_0} \varphi_R + 2 \frac{v_0}{v} (\varphi_C + \varphi_D)$$

De looptijd is in een zeker gebied van v -waarden constant als

$$\frac{d\omega\tau}{dv} = 0, \text{ d.w.z. als } \left(\frac{v}{v_0}\right)^2 = \frac{2(\varphi_C + \varphi_D)}{\varphi_R} \quad (9)$$

In ons geval doen we verstandig $(v/v_0)^2$ midden tussen 1 en 0,7 te kiezen, d.w.z. in (9) moet $(v/v_0)^2 = 0,85$ zijn. We vinden dus als derde voorwaarde:

$$2(\varphi_C + \varphi_D) = 0,85\varphi_R \quad (10)$$

De drie voorwaarden die we thans hebben afgeleid, laten ons in de keus van de diverse looptijden nog enige vrijheid. We hebben ons bij het doen van die keus laten leiden door de overweging dat de lengte van de bundel tussen katode en reflector in verband met het vereiste magneetveld zo klein mogelijk moet blijven. Dit leidt tot de keus $m = 1$. De spleetafstand φ_C is dan volgens (8) dus 1,25. Bij de kleinste waarde die m kan hebben, nl. nul, zou $\varphi_C = 0,25$ zijn en verkrijgt men een te kleine wisselstroomcomponent; vgl. formule (1). Bij $m = 2$ ofwel $\varphi_C = 2,25$ weegt het voordeel van de wat grotere stroom niet meer op tegen het nadeel van de verzwaring van de magneet.

Voor φ_D en φ_R zijn de kleinste waarden gekozen die met de andere twee voorwaarden verenigbaar zijn. Uit de voorwaarden (6) en (10) kan men afleiden:

$$\varphi_C + \varphi_D = 0,23(n + \frac{1}{2}) 2\pi$$

De kleinste waarde van n , waarbij dit in combinatie met $\varphi_C = 1,25$ een positieve waarde van φ_D oplevert, is $n = 6$. Hieruit volgt

$$\varphi_C + \varphi_D = 1,5, \text{ waaruit men kan afleiden: } \varphi_D = 0,25 \text{ en } \varphi_R = 3,5.$$

Voor φ_D is dit tevens ongeveer de kleinste waarde die realiseerbaar is in verband met de constructie.

De resonator

De resonator bestaat, zoals reeds werd vermeld, uit een combinatie van drie gekoppelde trilholten. De middelste hiervan is sterk gekoppeld met een vierde trilholte om de buis afstembaar te maken. Deze vierde trilholte bevindt zich gedeeltelijk buiten het vacuüm; zijn resonantiefrequentie kan daardoor gemakkelijk worden veranderd. Sterk vereenvoudigd vindt men het resonatorsysteem geschetst in fig. 7.

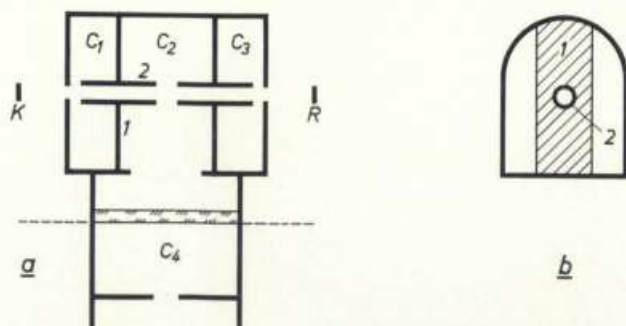


Fig. 7. De resonator van het nieuwe multireflexieklystron. De buis is afstembaar doordat de drie trilholten C_1 t/m C_3 (vgl. fig. 4) via C_2 gekoppeld zijn met een vierde (C_4), waarvan de resonantiefrequentie gevarieerd kan worden. Deze holte wordt deels gevormd door een ruimte in de buis, deels door een stuk van een aan te sluiten golfpijp (in (a) onder de streeplijn). De sterke koppeling tussen C_1 t/m C_3 is verkregen door deze wanden uit te voeren zoals in (b) is geschetst. De wanden zijn gereduceerd tot strippen 1, die de cilinders 2 dragen door welke de elektronen zich bewegen.

We beschouwen eerst het systeem van drie trilholten dat zich binnen het vacuüm bevindt. Men kan dit opvatten als een combinatie van drie inductief gekoppelde LC-kringen — de daarin voorkomende L en C noemen we de equivalenten zelfinductie en capaciteit —, waarvan de eerste en de derde gelijk zijn (fig. 8a). Een dergelijk systeem heeft drie resonantiefrequenties. Men ziet onmiddellijk dat één daarvan, die we ω_2 zullen noemen, optreedt wanneer de buitenste twee kringen in tegenfase oscilleren en de middelste „dood” is. Voor deze frequentie geldt: $\omega_2 = (L_1 C_1)^{-1/2}$. Deze symmetrische trillingswijze komt voor onze buis niet in aanmerking, daar er in dit geval geen spanning op de middenspleet is en derhalve geen koppeling met de vierde trilholte.

De andere resonantiefrequenties vindt men gemakkelijker door het schema eerst te tekenen als in fig. 8b. Daar er om redenen van symmetrie nooit spanning tussen de punten P en Q kan staan, mogen we dit schema voor ons doel halveren (fig. 8c). We krijgen dan een systeem van twee inductief gekoppelde kringen, hetwelk dus twee resonantiefrequenties heeft. We noemen de laagste ω_1 en de andere ω_3 . Bij de trillingsvorm met frequentie ω_1 is de spanning U op de middenspleet in tegenfase met de spanning αU op de twee andere. Bij de trillingsvorm met frequentie ω_3 zijn de spleetspanningen alle drie in fase. Onze buis is zo gedimensioneerd dat de trillingsvorm met frequentie ω_1 optreedt.

De vorm van de trilholten is zodanig dat de buitenste gelijk zijn aan een helft van de middelste. In fig. 4 is dit reeds schematisch aangegeven. Hierdoor is bereikt dat $\alpha \approx 0,5$ is, hetgeen blijkens de ervaring een geschikte waarde is.

Een sterke koppeling is verkregen door de gaten

in de wanden zeer groot te maken. In feite bestaan de wanden zoals men in fig. 7b heeft kunnen zien, slechts uit strippen. Deze strippen zijn zo smal als verenigbaar is met de eis van voldoende warmtegeleiding. Een groot deel van het vermogen wordt nl. gedissipeerd in de in fig. 7b met 2 aangeduide cilinders.

Dank zij het feit dat de drie trilholten sterk gekoppeld zijn, zodat we ze min of meer als één trilholte kunnen beschouwen, zal de koppeling van de middeltrilholte aan de vierde trilholte de factor α niet sterk doen veranderen. Bovendien ligt dan de frequentie ω_3 voldoende ver buiten het afstemgebied van de buis.

Het compromis tussen de eis van sterke koppeling en die van goede warmtegeleiding in de strippen heeft voor de resonantiefrequenties ω_1 en ω_3 geleid tot de waarden 8900 en 11 400 MHz, de in het begin genoemde frequentie ω_2 bedraagt 10 000 MHz.

Daar we in de frequentiegebieden rondom ω_1 en ω_3 het systeem van drie bij benadering mogen ver-

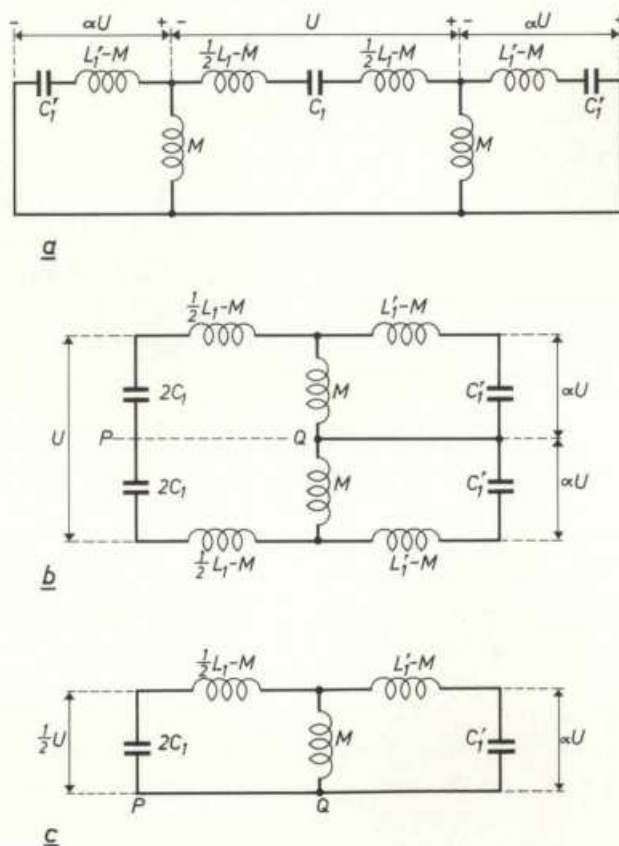


Fig. 8a) Vervangingschema van het inwendige deel van de resonator. Men onderscheidt drie inductief gekoppelde LC-kringen, waarvan de eerste en de derde gelijk zijn en die corresponderen met de trilholten C_1 , C_2 en C_3 . De grootheden die betrekking hebben op de buitenste kringen zijn voorzien van een accent. M is de coëfficiënt van wederzijdse inductie.

b) Andere vorm voor het schema (a). Daar, wegens de symmetrie, de punten P en Q steeds dezelfde potentiaal zullen hebben, mag men ze verbinden en derhalve dit schema halveren, waardoor men schema (c) verkrijgt.

vangen door één trilholte, kunnen we nu de eigenschappen van de gehele resonator snel vinden door deze te beschouwen als een combinatie van die denkbeeldige ene trilholte met de vierde. Deze combinatie heeft weer de eigenschappen van een systeem van twee inductief gekoppelde kringen. Ligt de frequentie ω_0 van de vierde trilholte in de buurt van ω_1 , dan zijn er in plaats van deze ene resonantiefrequentie twee, die we ω_{11} en ω_{12} noemen. Evenzo treden er in plaats van ω_3 twee resonantiefrequenties ω_{31} en ω_{32} op als ω_0 in de buurt van ω_3 ligt. (De frequentie ω_2 wordt niet gestoord of gesplitst, daar de hierbij behorende trilling de vierde trilholte immers niet kan aanslaan.) In verband met de afmetingen van het inwendige resonatorsysteem is het, naar ons bleek, het gunstigst om gebruik te maken van de hoogste van de twee frequenties ω_{11} en ω_{12} ; we noemen die ω_{12} .

Noemen we de resonantiefrequentie van de buiten-trilholte ω_0 , dan geldt voor de frequenties van de gehele resonator, voor het geval dat de koppelingsgraad k tussen de buitentrilholte en de binnentrilholte klein is ten opzichte van één:

$$\frac{\omega_{11} - \omega_1}{\omega_1} = \frac{1}{2}[\gamma - \sqrt{\gamma^2 + k^2}], \quad (4a)$$

en

$$\frac{\omega_{12} - \omega_1}{\omega_1} = \frac{1}{2}[\gamma + \sqrt{\gamma^2 + k^2}], \quad (4b)$$

waarin γ het relatieve verschil $(\omega_0 - \omega_1)/\omega_1$ in resonantiefrequentie van de twee kringen is ⁶⁾. Delen we deze uitdrukkingen door k , dan zien we dat

$$(\omega_{11} - \omega_1)k\omega_1 \text{ resp. } (\omega_{12} - \omega_1)k\omega_1$$

alleen functies van γ/k kunnen zijn. Deze functies vindt men uitgezet in fig. 9. Deze figuur illustreert het uit de trillingsleer welbekende effect dat van de resonantiefrequenties van de gekoppelde trilholten (kringen) de ene groter is dan de grootste van de frequenties van de niet-gekoppelde trilholten, en de andere kleiner dan de kleinste. De laagste waarde die ω_{12} theoretisch kan aannemen, is dus de waarde ω_1 , d.w.z. de laatstgenoemde frequentie bepaalt de ondergrens van het afstemgebied van de buis.

De bovengrens van het afstemgebied wordt bepaald door de in de vierde trilholte optredende verliezen. Naarmate ω_0 groter is, wordt het verschil tussen ω_{12} en ω_0 kleiner — in fig. 9 nadert

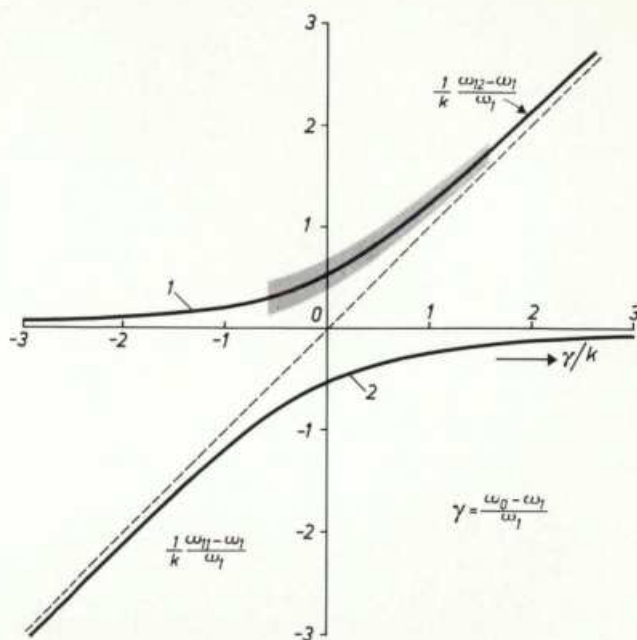


Fig. 9. Ter verklaring van de ligging van het gebied waarbinnen de afstemming gevarieerd kan worden. De afstemfrequentie ω_{12} ligt steeds boven de resonantiefrequentie ω_1 van de drie inwendige trilholten (als één geheel beschouwd) en boven de resonantiefrequentie ω_0 van de vierde trilholte. Voor zeer grote negatieve γ nadert ω_{12} tot ω_1 en voor grote positieve γ — dan is $\omega_0 > \omega_1$ — tot ω_0 . In het laatste geval treden er grote verliezen op in de vierde trilholte. Deze bepalen de bovengrens van het praktisch bruikbare afstemgebied (gearceerd). De ondergrens daarvan is theoretisch ω_1 . Praktisch wordt deze grens bepaald door de laagste waarde die ω_0 kan hebben.

kromme 1 de streeplijn meer naarmate γ/k groter is — en oscilleert de vierde trilholte sterker. De verliezen P_1 hierin nemen dus met stijgende ω_0 toe en maken ten slotte een groot deel uit van het door de binnentrilholten afgegeven vermogen P_i . Het uitgangsvermogen $P_i - P_1$ is dan dus klein, des te kleiner naarmate ω_0 groter is. In de nieuwe buis bleek het mogelijk bij een k -waarde van 0,06 de grootte γ/k te variëren van $-0,6$ tot $+1,6$ (vgl. fig. 9). Dit correspondeert met een afstemgebied van 9100 tot 9800 MHz, een frequentiegebied dat de civiele radarband (9320-9500 MHz) ruimschoots omvat. De waarden van de belangrijkste grootheden vindt men samengevat in tabel I.

Tabel I. De belangrijkste grootheden betreffende het 3-cm-multireflexieklystron voor toepassing in ramarkbakens. Alle spanningen zijn gerekend ten opzichte van de katode.

Spanning op resonator	+ 3000 V
Stroom naar resonator	20 mA
Spanning op doorboorde reflector-elektrode	+ 650 V
Spanning op massieve reflector-elektrode	— 750 V
Mechanisch afstemgebied	9100-9800 MHz
Uitgangsvermogen bij 9500 MHz	9-12 W
Uitgangsvermogen bij de grenzen van het afstemgebied	7 W

⁶⁾ Men kan (4a) en (4b) direct afleiden uit de formule voor de twee resonantiefrequenties van een systeem bestaande uit twee gekoppelde oscillatoren. Men vindt deze formule in de meeste boeken waarin de leer der elektrische of mechanische trillingen behandeld wordt.

De constructie

De constructie van de nieuwe buis lichten we toe aan de hand van *fig. 10*, die een doorsnee toont. De buis wordt op aanstonds te beschrijven wijze samengesteld uit vier afzonderlijk klaarge maakte delen, te weten de resonator, het elektronenkanon, de reflector en de ballon.

De drie trilholten C_1 , C_2 en C_3 die het inwendige deel van de resonator vormen, zijn geheel van zuur-

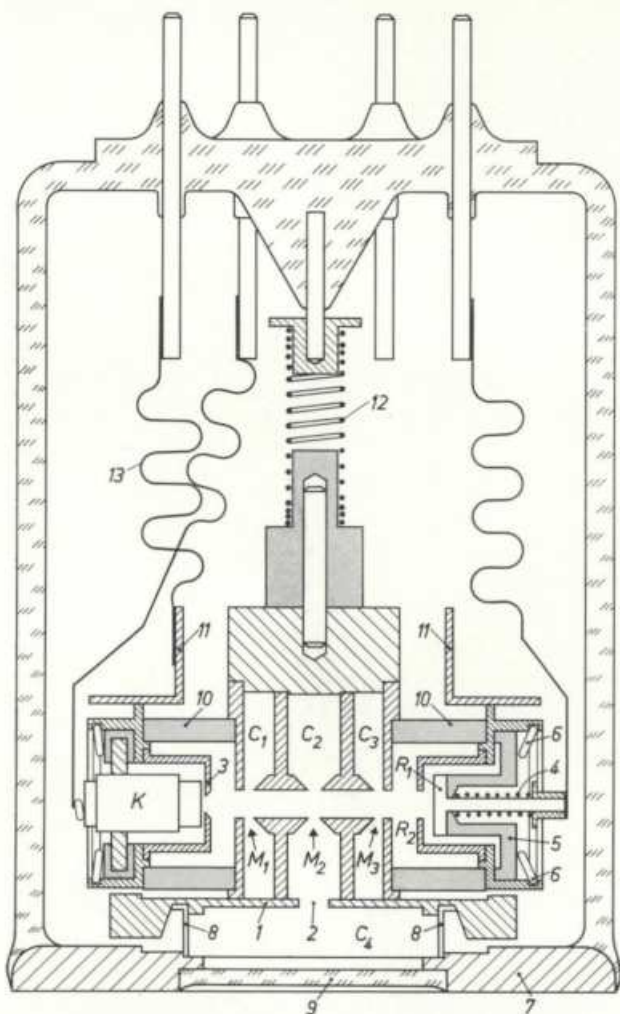


Fig. 10. Schematische doorsnede van de buis (iets vereenvoudigd). Men onderscheidt beneden in het midden de drie trilholten C_1 t/m C_3 van de resonator met de drie interactiespleten M_1 t/m M_3 . De bodem 1 van de resonator bevat een sleuf 2 die C_2 aan de vierde trilholte C_4 koppelt. Links van de resonator de katode K met de hulpelektrode 3. Rechts de reflector met de vlakke elektrode R_1 en de doorboorde elektrode R_2 . 4 veertje dat R_1 op de isolator 5 gedrukt houdt. (Alle geschaduwde partijen stellen doorsneden van isolatiemateriaal voor.) 6 veer die 5 op zijn plaats houdt (bij de katode-eenheid treft men een analoge veer aan). 7 eindplaat van molybdeen met kraag 8 (koper) en een venster 9 van glas dat in het frequentiegebied van de buis arm is aan verliezen. 10 afstandsringen. 11 aan katode en reflector bevestigde flenzen waardoor naast de resonator (in de figuur boven en onder het vlak van tekening; vgl. *fig. 11*) trekstangetjes gaan die deze eenheden op de ringen 10 gedrukt houden. 12 veer die de bodem 1 van de resonator op de kraag 8 drukt (na het aaneensolderen van 8 en 1 heeft 12 geen functie meer). 13 molybdeenbandjes die de elektrodes verbinden met de pennen in de buisvoet (die voor R_2 , de resonator en 3 zijn niet getekend).

stofvrij koper gemaakt. De bodemplaat 1, die voorzien is van de koppelsleuf 2, fungeert tevens als bodem van de vierde trilholte C_4 . Deze bevindt zich, zoals vermeld werd, grotendeels buiten de buis. De vacuümdichte afsluiting 9 van de ballon gaat dwars door C_4 heen, maar beïnvloedt het elektromagnetische veld niet essentieel.

Het elektronenkanon (in *fig. 10* links van de resonator) bestaat uit een katode K en een doorboorde elektrode 3, die K geheel omvat en voor het instellen van de bundelstroom dient.

De reflectoreenheid (rechts van de resonator), bestaande uit de massieve elektrode R_1 en de doorboorde R_2 , lijkt geometrisch sterk op het elektronenkanon. R_1 wordt door het veertje 4 tegen de isolator 5 gedrukt. Deze wordt in de bus die R_1 draagt, geklemd door de ring 6.

De ballon bestaat uit een voet en een cilindrische wand van glas en een eindplaat 7 van molybdeen. Dit metaal is gekozen omdat het tegelijkertijd niet-magnetisch is en met glas verbonden kan worden. Deze eindplaat is voorzien van een centraal rond gat waaromheen aan de binnenzijde van de ballon een kraag 8 van dun koper is gesoldeerd, die past in een uitsparing in de bodemplaat 1 van de resonator. Het gat is vacuümdicht afgesloten door middel van het reeds genoemde venster 9, dat gemaakt is van een glassoort die in het frequentiegebied van de buis weinig verliezen heeft.

Bij het samenstellen van de buis worden eerst het elektronenkanon en de reflectoreenheid aan de resonator bevestigd. Ze worden in de juiste positie gehouden door de isolerende afstandsringen 10. Het geheel wordt bijeengehouden door twee trekstangetjes die evenwijdig lopen met de hartlijn van het geheel en die ieder ter hoogte van deze hartlijn door een gat in de wand van de resonator, en door gaten in de flenzen 11 gaan. Ze zijn aan het eind voorzien van veertjes die deze flenzen in de richting van de resonator drukken (vgl. *fig. 11*).

Daarna worden de elektrodes door middel van slappe molybdeenbandjes 13 verbonden met de pennen in de voet en wordt het geheel in de ballon gebracht. Hierbij drukt de veer 12 de bodemplaat van de resonator tegen de koperen kraag 8. Tussen de plaat 1 en de kraag 8 is tevoren een ringetje laagsmeltend soldeer gelegd. Tijdens de verhitting aan de vacuümpomp, die noodzakelijk is voor het ontgassen, smelt het soldeer. Aldus ontstaat er een verbinding tussen trilholte en molybdeenschijf die zowel de elektrische stroom als de warmte goed geleidt.

Men bereikt op deze wijze niet alleen dat ook de vierde trilholte een goede kwaliteitsfactor heeft,



Fig. 11. Het 3-cm-multireflexieklystron voor microgolfbakens. Onderaan ziet men de eindplaat van molybdeen met venster voor aansluiting op golfpijp. Juist daarboven in het midden de aansluiting op de katode van het molybdeenbandje dat deze met een der pennen in de voet verbindt. Daaromheen een der flensplaten 11 van fig. 10 met de uiteinden van de trekstangjes die de katode- en de reflectoreenheid op de resonator drukken.

maar eveneens dat het door de bundel op de resonator gedissipeerde vermogen en het in de resonator gedissipeerde hoogfrequentvermogen via een kleine warmteweerstand worden afgevoerd naar de molybdeenplaat. Deze wordt gekoeld door geleiding naar het uitwendige deel van de vierde trillholte, dat er immers tegenaan geklemd wordt. De temperatuur van de resonator blijft zodoende laag, wat zowel gunstig is voor de levensduur van de buis als voor de frequentiestabiliteit en het rendement. (Bij hogere temperatuur is de weerstand van het koper groter en heeft men dus hogere verliezen.)

De uitgangsketen

Ten behoeve van de afstemming (trillholte C_4) en de aanpassing aan een uitwendige keten moet op de buis een klein stukje rechthoekige golfpijp worden aangesloten, dat door een doorboord dwarsschot in twee ruimten is verdeeld. Eén daarvan maakt het grootste deel uit van C_4 . Fig. 12 geeft schematisch

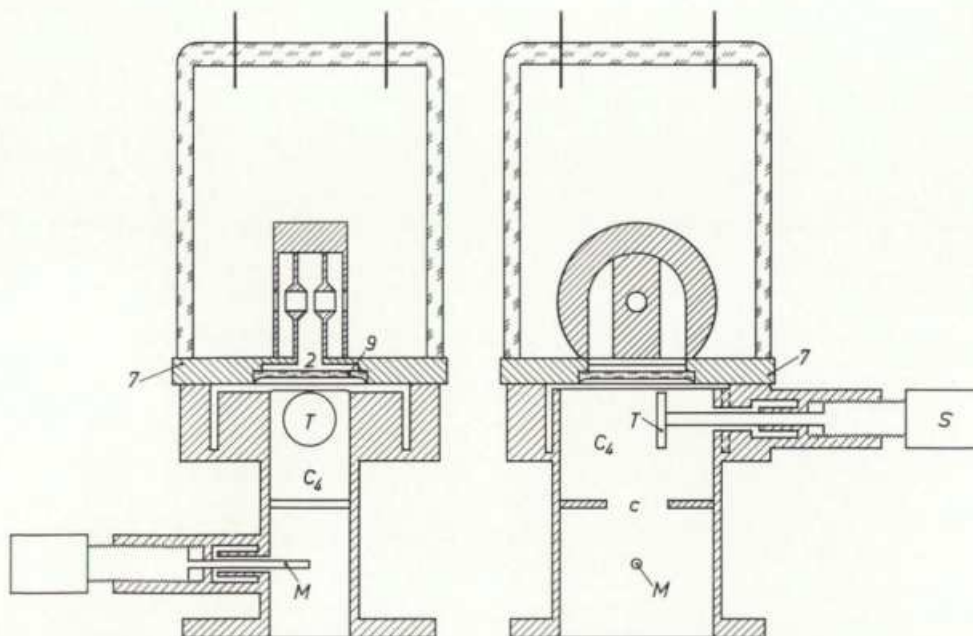


Fig. 12. Schematische doorsnede van de buis in twee onderling loodrechte richtingen, met daarop aangesloten een stukje golfpijp voor afstemming en aanpassing. De ruimte C_4 vormt het uitwendige deel van de vierde trillholte (vgl. fig. 7). Deze ruimte is door middel van de spleet c gekoppeld met de rest van de uitwendige keten. T afstemplaatje, verstelbaar met micrometerschroef S . Voor 50-Hz-modulatie wordt T in trilling gebracht door een soort luidsprekersysteem (niet getekend). M aanpassen, eveneens op micrometerschroef. De cijfers hebben dezelfde betekenis als in fig. 10.

twee onderling loodrechte doorsneden van deze uitgangsketen, waarin men tevens kan zien hoe ze op de buis aansluit.

Om de trilholtte C_4 afstembaar te maken, is in de golfpijp een rond koperen plaatje T aangebracht dat met behulp van de schroef S verplaatst kan worden

van de diepte van deze pen in de uitgangsgolfpijp kan de impedantie van de belasting zodanig worden gekozen dat de buis het maximale uitgangsvermogen geeft.

De mechanische koppeling van de uitgangsgolfpijp met de buis geschiedt door middel van een

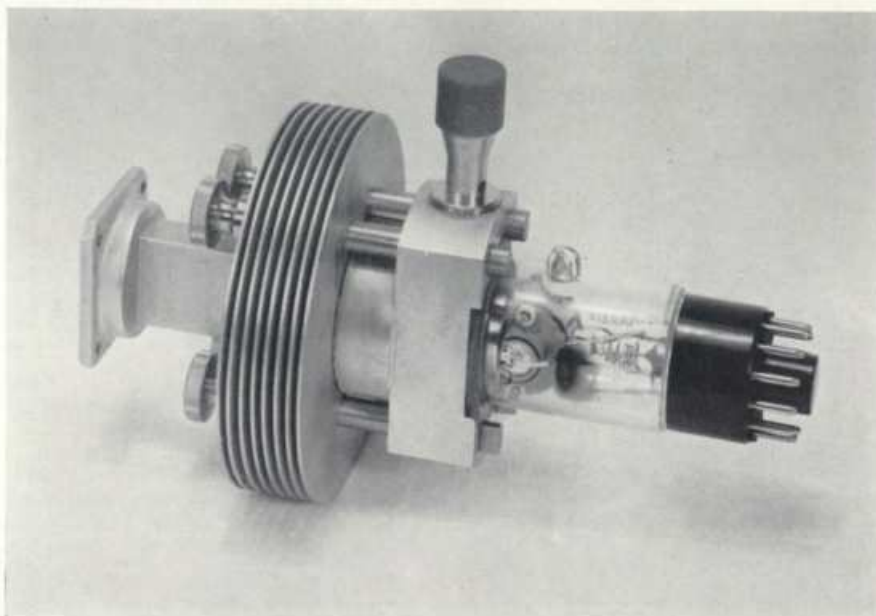


Fig. 13. De buis, gekoppeld aan de uitwendige golfpijp voor afstemming, waarvan de doorsnede geschetst is in fig. 12.

van de smalle wand tot het midden van de trilholtte. Wanneer het plaatje bij de wand is, stoort het het veld in de trilholtte weinig; bij verplaatsing naar het midden wordt de equivalente capaciteit van de trilholtte vergroot en dus zijn resonantiefrequentie verlaagd.

Om een frequentiemodulatie te bewerkstelligen met een modulatiefrequentie van b.v. 50 Hz, zoals voor de zender van een ramarkbaken vereist is, wordt het staafje waar het plaatje T aan bevestigd is, verbonden met een inrichting die vrijwel overeenkomt met het aandrijfsysteem van een luidspreker. Deze inrichting doet het afstemplaatje in de trilholtte een axiale trilling uitvoeren met de gewenste modulatiefrequentie. Om de voor een baken vereiste frequentiezwaai van 100 MHz te verkrijgen, moet de amplitude van de trilling ongeveer 0,6 mm zijn. Het „luidsprekersysteem” met het daaraan bevestigde afstemplaatje kan zelf weer door middel van een afstemschroef axiaal worden bewogen voor het instellen van de centrale frequentie.

In de andere ruimte O van de uitgangsgolfpijp is een zg. aanpassen M aangebracht. Door variatie

normale groeofflens, waar de molybdeenschijf van de buis tegenaan wordt gedrukt. Hierdoor kan, zoals gezegd, de in de buis gedissipeerde warmte gemakkelijk afvloeien naar de golfpijp. Fig. 13 toont een foto van de combinatie van buis en uitgangsgolfpijp.

Samenvatting. In ramark-microgolfbakens voor de scheepvaart heeft men behoefte aan zendbuizen voor 3-cm-golven die bij een uitgangsvermogen van ca. 10 W een frequentiezwaai door de gehele civiele radarband (9320 tot 9500 MHz) toelaten bij een modulatiefrequentie van 50 Hz en ook nog een 10^4 -Hz-modulatie met een zwaai van 10 à 15 MHz. Beschreven wordt een nieuw multireflexieklystron met hoog rendement (15-20%) dat aan deze eisen voldoet en dat, eveneens in tegenstelling tot de bestaande 10-watts-buizen, bovendien mechanisch verstelbaar is (over 8%). De pakketvorming geschiedt hierin doordat de resonator bestaat uit drie gekoppelde trilholtten, ieder met een eigen interactiespleet. Het vereiste veld met parabolisch potentiaalverloop is benaderd door een veldvrije ruimte, waarin zich de resonator bevindt, geflankeerd door twee remruimten met lineair verlopende potentiaal. De in de elektronenbundel optredende wisselstroom wordt berekend en hieruit de gunstigste dimensionering van de buis. De afstemming en de 50-Hz-modulatie geschieden met een vierde trilholtte die met de drie andere gekoppeld is, en die grotendeels gevormd wordt door een deel van de uitwendige keten. De buis is van glas met een eindplaat van molybdeen, waarin een venster van verliesarm glas. De koeling geschiedt door geleiding via de molybdeenplaat naar de uitgangsgolfpijp.

OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLIKATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

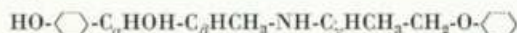
Van deze publikaties, voor zover niet met een sterretje * gemerkt, verstrekt de Administratie van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven, op aanvraag overdrukken.

3023: H. A. Sloot: Luchtsterilisatie-methoden (Pharmaceut. Weekblad **96**, 703-712, 1961, no. 18).

De auteur beschrijft en vergelijkt de vier belangrijkste methodes ter sterilisatie van lucht, nl. filtratie, elektrostatische precipitatie, bestraling met ultraviolet en het verdampen van desinfectantia.

3024: J. van Dijk en H. D. Moed: Synthesis of β -phenylethylamine derivatives, VII. The enantiomers of erythro-1-(4'-hydroxyphenyl)-2-(1''-methyl-2''-phenoxyethyl-amino)-propanol-1 (Rec. Trav. chim. Pays-Bas **80**, 573-587, 1961, no. 7).

Het vaatverwijdend geneesmiddel „Duvadilan” met de formule:



is een mengsel van twee enantiomeren (optische antipoden, aangeduid met (+) en (-)). De auteurs hebben deze enantiomeren gescheiden met behulp van het enantiomerenpaar (+)- en (-)-amandelzuur en van beide de ruimtelijke configuratie bepaald, nl. (+) = αR ; βS ; γS en (-) = αS ; βR ; γR . Zie ook Philips techn. T. **24**, 73-84, 1962 (no. 3) en **2709**.

3025: W. J. A. Goossens en H. J. G. Meyer: Enkele basisbegrippen uit de fysica van halfgeleiders (Ned. T. Natuurk. **27**, 324-344, 1961, no. 9).

De auteurs geven een bevattelijke fundamentele uiteenzetting van de basisbegrippen uit de theorie der halfgeleiders, die vaak te oppervlakkig wordt behandeld. Uitgaande van de vergelijking van Schrödinger, leiden zij de energiebanden af voor een perfect kristalrooster. Onder meer komen ter sprake het verschil tussen geleiders, isolatoren en halfgeleiders, de bandenstructuur van halfgeleiders, en de snelheid, versnelling en effectieve massa van de elektronen. Tot slot wordt de invloed van roosterfouten op de bandenstructuur beschreven.

3026: H. G. van Bueren en J. Hornstra: Grain boundaries and the sintering mechanism (Reactivity of solids, Proc. 4th int. Symp. on the reactivity of solids, Amsterdam, 30 mei-4 juni 1960, red. J. H. de Boer e.a., blz. 112-121, Elsevier, Amsterdam 1961).

Bij het sinteren van metalen wil men dikwijls zo goed mogelijk voorkomen dat er poriën in het materiaal overblijven. Bij de bestudering van het sinterproces is gebleken dat korrelgrenzen de vacatures opnemen die van de poriën wegdiffunderen, waardoor de laatstgenoemde in een fijnkorrelig materiaal het snelst verdwijnen. Nadere beschouwing leidt tot het inzicht dat het opnemen van vacatures door de korrelgrenzen gepaard kan gaan met plastische vloeien (het langs elkaar glijden van de korrels). Hiermede zijn tegenstrijdigheden in de literatuur op dit punt grotendeels opgeheven. Zie ook no. **2966**.

3027: J. Hornstra: Dislocations, stacking faults and twins in the spinel structure (als **3026**, blz. 563-570).

Hoewel dislocaties in de theorie van de kristalroosters reeds lang een grote rol spelen, is bij gebrek aan experimentele methoden het invendigen van de dislocaties zelf nog weinig bestudeerd. Toch is om verschillende redenen een gedetailleerde kennis van de dislocatie zeer gewenst. Uitgaande van een model voor het spinelrooster en daarbij alleen de elektrostatische krachten in aanmerking nemende, kan men enkele eigenschappen van een dislocatie voorspellen, zoals de keuze van het glijvlak. Deze keuze wordt onder meer bepaald door het aantal partiële dislocaties en de voorwaarde van elektroneutraliteit. Zie ook no. **2923**.

3028: F. K. Lotgering: Conservation of crystal orientation of hexagonal iron-oxide compounds during solid-state reactions (topotaxy) (als **3026**, blz. 584-586).

Symposiumverslag betreffende hetzelfde onderwerp als dat van publikatie **2938**.

3029: W. L. Wanmaker en C. Bakker: The determination of luminescent properties as a method for the study of diffusion processes in the solid state (als **3026**, blz. 709-717).

Voor het bestuderen van de diffusie in de vaste stof kan men het volgende hulpmiddel te baat nemen. Luminescentie doet zich alleen voor in de nabijheid van een vreemd ion in het kristalrooster (activatorion). Men maakt eerst een kristal zonder activator en verhit het dan terwijl het tegen een geschikte verbinding van het activatorion aanligt. De diffusie van het activatorion in het moederkristal kan nu worden gevolgd door middel van de voortschrijdende luminescentie. Deze methode kan op een zeer breed terrein worden toegepast. Er is een begin gemaakt met het bestuderen van de diffusie van Sb- en Mn-ionen in calciumhalofosfaat, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F},\text{Cl})_2$, dat dezelfde kristalstructuur heeft als het mineraal apatiet.

3030: H. G. Grimmeiss en H. Koelmans: Analysis of P-N-luminescence in Zn-doped GaP (Phys. Rev. **123**, blz. 1939-1947, 1961, no. 6).

Een P-N-overgang in een halfgeleidende stof kan licht uitzenden wanneer men er een spanning op aanlegt. Dit artikel beschrijft een fase van het onderzoek dat erop is gericht het lichtrendement van dit effect te verhogen. Zie ook **R 398** en Philips techn. T. **22**, 384-385, 1960.

3031: N. V. Franssen: Eigenschaften des natürlichen Richtungshörens und ihre Anwendung auf die Stereophonie (Proc. 3rd int. congress on acoustics, Stuttgart, 1959, red. L. Cremer, deel II, blz. 788-790, Elsevier, Amsterdam 1961).

Kort overzicht van de materie die in publikatie **2889** uitvoerig is behandeld.

3032: C. M. van der Burgt: Neue keramische Ultraschallwandler und deren Kopplung an die Flüssigkeit (als **3031**, blz. 1219-1221).

Voor het efficiënt opwekken van ultrasone trillingen kunnen Ni-Cu-Co-ferrieten worden gebruikt. De auteur bespreekt de eisen waaraan deze ferrieten moeten voldoen wanneer het gaat om trillingen van groot vermogen en met een frequentie tussen 20 en 50 kHz. Zie ook **2902**.

3033: A. Recourt en G. H. F. de Vries: An experimental apparatus for contact microradiography at 200-500 V (Nature **191**, 1185-1186, 1961, no. 4794).

Bij contactmicroradiografie (Philips techn. T. **19**, 185-216, 1957) wordt de röntgenbundel te veel verzwakt wanneer hij door het venster van de röntgenbuis uittreedt. De auteurs hebben een experimenteel apparaat gebouwd waarbij de bron van de röntgenstralen, het preparaat en de film zich in dezelfde geëvacueerde ruimte bevinden, waardoor het venster geheel is vervallen.

3035: J. L. Meijering: Considérations sur l'effet Snoek dans le cas de sites non-équivalents pour les atomes et insertion (Métaux, Corr., Ind. **36**, 107-111, 1961, no. 427).

De piek in de Snoek-damping veroorzaakt door de aanwezigheid van interstitiële N-atomen in een Fe-rooster, ligt bij ongeveer 25 °C. Door in het Fe-rooster enige Fe-atomen te substitueren door Mn-atomen, wordt de piek verbreed en verschoven naar wat hogere temperatuur. In de verbrede piek kan men 3 enkelvoudige pieken onderscheiden, waarvan de middelste beantwoordt aan de damping bij afwezigheid van Mn. Om de beide andere pieken te kunnen verklaren, wordt aangenomen dat de N-atomen zich in de buurt van een Mn-atoom in twee soorten holten kunnen bevinden, die een verschillende vrije energie hebben. Ter vereenvoudiging van het probleem beschouwt de auteur, in plaats van het werkelijke geval, de damping die wordt veroorzaakt door N-atomen die zich kunnen bevinden in octaëdrische en tetraëdrische holten in een kubisch rooster.

(van b.v. zuiver Cu). Berekeningen leiden tot de conclusie dat in dit analoge geval eveneens drie pieken moeten ontstaan.

3034: J. D. Fast, J. L. Meijering en M. B. Verrijp: Frottement interne dans les alliages ferritiques Fe-Mn-N (Métaux, Corr., Ind. **36**, 112-114, 1961, no. 427).

Nadere beschouwingen over de onderlinge positie van de drie pieken die worden genoemd in de hierna voorafgaande publicatie **3035**. Uit experimenten met een verschillend mangaan-gehalte wordt geconcludeerd dat een mechanisme overheerst waarbij Mn-Mn-paren een rol spelen. Een N-atoom is aan een dergelijk paar sterker gebonden dan aan een enkel Mn-atoom, maar blijkt desondanks in het eerste geval beweeglijker te zijn.

3036: W. van Gool en A. P. Cleiren: Bemerkungen zur Natur der Leuchtzentren in aktivatorfreien ZnS-Luminophoren (Z. Naturf. **16a**, 948-950, 1961, no. 9).

Men kan ZnS gemakkelijk verwerken tot een fluorescerende stof door het te gloeien samen met een halogenide. De aard van de roosterverstoring die verantwoordelijk is voor de blauwe fluorescentie die zich voordoet bij bestraling met ultraviolet, is tot op heden niet met zekerheid vastgesteld. De auteurs noemen vijf mogelijke verstoringen en bespreken waarom de experimentele gegevens niet tot een ondubbelzinnige uitspraak leiden. Zie ook **2988**.

3037: C. Wandsdröck: Miniature condenser microphones (als **3031**, blz. 638-640).

De auteur bespreekt de eigenschappen van twee door hem ontworpen condensatormicrofoons met kleine afmetingen (diameter 8 mm en lengte 55 mm), zoals vereist zijn voor akoestische metingen en studio-opnamen. Een van de microfoons heeft een voorkeursrichting in de gevoeligheid, terwijl de andere in alle richtingen even gevoelig is.

3038: D. L. A. Tjaden: Some considerations on the recording process on magnetic tape with application of H.F. bias (als **3031**, blz. 758-760).

De auteur heeft metingen verricht over de gevoeligheid van magnetofonband als functie van de amplitude van het signaal en over de dikteverliezen als functie van de registratiediepte. De resultaten stemmen redelijk overeen met de theorie.

3039: J. Hornstra: Rectificatie van krommen (Chem. Weekblad **57**, 541-544, 1961, no. 42).

Bij het grafisch voorstellen van een experimenteel verband tussen fysische grootheden is het dikwijls voordelig niet de grootheden zelf tegen elkaar uit te zetten, doch geschikte functies ervan, die zodanig zijn gekozen dat een rechte lijn ontstaat. Parameters in het verband kunnen dan gemakkelijker en nauwkeuriger worden bepaald. Dit wordt toegelicht aan de hand van een aantal voorbeelden, waarna een beschouwing volgt over de foutberekening en over de grenzen der toepasbaarheid van de methode. — De auteur wil met deze publicatie een leemte in de literatuur aanvullen, die is gebleken bij het afnemen van het tentamen U.T.K.-wiskunde. Een groot deel van de kandidaten was met deze praktische methode onbekend.

3040: W. J. Oosterkamp en Th. G. Schut: Magnetische Speicherung von Röntgenbildern (Elektromedizin **6**, 147-152, 1961, no. 3).

Korte bespreking van het gebruik van de televisietechniek in de medische röntgendiagnostiek, met name van het geheugenwiel, waarop een aantal röntgenbeelden tegelijk kunnen worden geregistreerd. Zie ook **3016** en Philips techn. T. **22**, 1-11, 1960 (no. 1).

R 421: S. A. Wytzes: Theoretical considerations on the collimators of an X-ray spectrograph (Philips Res. Repts. **16**, 201-224, 1961, no. 3).

Onderzoek naar de wijze waarop bij een röntgenspectrograaf profiel en intensiteit van de lijnen in het registrogram afhangen van de afmetingen van de collimators en van de eigenschappen van het reflexiekristal. Er worden eenvoudige grafische methodes afgeleid om het lijnprofiel te bepalen voor het geval dat de diffractiehoek precies 2θ is, maar de hoek tussen de normaal op het roostervlak en de bissectrice van de hoek

tussen de invallende en de gereflecteerde straling een gegeven spreiding vertoont, en ook voor het geval dat ook de diffractiehoek spreiding vertoont.

R 422: A. Baelde: The influence of non-uniform base width on the noise of transistors (Philips Res. Repts. **16**, 225-236, 1961, no. 3).

De experimenteel bepaalde en de theoretisch voorspelde waarde van de ruisweerstand van een transistor komen niet altijd met elkaar overeen. Er wordt aangetoond dat men dit moet toeschrijven aan een basisdikte die niet overal dezelfde waarde heeft. De effectieve basisweerstand, die in hoofdzaak de ruisweerstand bepaalt, is dan groter dan men uit admittantiemetingen afleidt.

R 423: P. A. H. Hart en F. L. van der Vinne: The measurement of the noise quantities of the EC 56 at 1400 Mc/s (Philips Res. Repts. **16**, 237-244, 1961, no. 3).

Aan de microgolfbuis EC 56 zijn ruismetingen verricht bij 4000 MHz (zie **R 393**). De auteurs hebben soortgelijke metingen gedaan bij 1400 MHz, waarvoor de experimentele methodes veel ingewikkelder zijn. Uit de vier gemeten karakteristieke ruisgrootheden van de genoemde buis kan de minimale ruisfactor worden afgeleid van een lopendegolfbuis waarin dezelfde elektronenbundel wordt gebruikt. De resultaten van de metingen zijn in overeenstemming met de theorie gegeven door Vlaardingerbroek (**R 393**).

R 424: J. H. N. van Vucht: Kinetic study of the reaction of Th_2Al with H_2 (Philips Res. Repts. **16**, 245-265, 1961, no. 3).

Het absorberen van waterstof door een getterpoeder geschiedt volgens een autokatalytische reactie. De metaalkorrels zijn aanvankelijk bedekt met een dunne laag oxyde of nitride. De reactie wordt dan vertraagd doordat de waterstof slechts langzaam door de laag diffundeert. De absorptie begint daarom eerst ten volle wanneer het metaal zoveel waterstof heeft opgenomen dat deze door uitzetting de laag doet barsten.

R 425: M. Koedam: Cathode sputtering by rare-gas ions of low energy (Philips Res. Repts. **16**, 266-299, 1961, no. 3).

Tweede gedeelte van de dissertatie die onder no. **R 416** reeds geheel is samengevat.

A 40: A. Klopfer: Die Erzeugung von Höchstvakua mit Getter-Ionenpumpen und das Messen von sehr tiefen Drucken (Vakuum-Technik **10**, 113-118, 1961, no. 4).

Beschrijving van experimenten waaruit is gebleken dat een getter-ionenpomp werkend met een gasontlading met koude katode, zeer geschikt is om er zeer lage drukken mee te verkrijgen, en deze gedurende lange tijd te handhaven, in kleine vacuümopstellingen in het laboratorium. De laagste tot nu toe bereikte totale druk bedroeg 6×10^{-12} torr. Het restgas, dat geanalyseerd werd met een omegatron, bestond in hoofdzaak uit waterstof en stikstof. De gebruikte opstelling en de wijze waarop werd gepompt, worden beschreven. Het drukverloop als functie van de tijd en de drukverhoging na uitschakelen van de pomp worden besproken, evenals methodes om de zeer lage drukken te meten.

A 41: B. Lersmacher en S. Scholz: Drucksintern von Hafnium-, Zirkon- und Tantalkarbid ohne Bindephase (Arch. Eisenhüttenw. **32**, 421-429, 1961, no. 6).

Gesinterde carbiden van metalen als hafnium, zirkoon en tantaal vinden in de techniek veelvuldig toepassing als hardmetaal. Ze bevatten meestal ca. 3% van een metaal dat dienst doet als binder. De binder stelt een grens van ca. 800 °C aan het bruikbare temperatuurgebied. Door sinteren onder hoge druk kan men hardmetalen zonder binder vervaardigen, die tot aanzienlijk hogere temperaturen bruikbaar zijn. Uit systematisch onderzoek is gebleken dat er voor dit sinteren onder hoge druk een gunstigste temperatuur bestaat, en dat toevoeging van ca. 1% van bepaalde metalen (vooral Mn, Co of Ni) het sinterproces versnelt. De invloed van voorverhitting in vacuüm, van de maalduur in een kogelmolen met kogels van agaat, en van de behandeling van het te sinteren poeder met een oplossing van Mn in zoutzuur of zwavelzuur, is onderzocht. De waargenomen verschijnselen worden besproken in verband met theoretische overwegingen.

A 42: S. Garbe: Zur Wasserabgabe von Natriumsilikatgläsern (Glastechn. Ber. 34, 413-417, 1961, no. 8).

Door ontgassing van glasmonsters in vacuüm en meting van de partiële drukken der afgegeven gassen met een omegatron is de hoeveelheid water bepaald die wordt afgegeven door natrium-silicaatglazen met 7 tot 40 mol-% Na_2O , in het temperatuurgebied van 500 tot 900 °C. De in de glazen opgeloste hoeveelheid water vertoont een minimum bij 20 mol-% Na_2O . Uit de metingen zijn de diffusiecoëfficiënten van water in de glazen afgeleid. Bij 900 °C nemen deze coëfficiënten sterk toe met het natriumgehalte, bij 550 °C vertonen zij daarentegen minima bij 20 mol-% Na_2O . De activeringsenergie voor de waterafgifte blijkt afhankelijk te zijn van het natriumgehalte. De resultaten van het onderzoek worden verklaard aan de hand van de opvatting dat het „water” in alkaliglasen op twee verschillende manieren is opgenomen, nl. 1) in de vorm van vrije Si-OH-groepen, en 2) in de vorm van hydroxylgroepen gebonden aan Si waartussen een waterstofbrugbinding bestaat.

A 43: P. Gerthsen: Thermoelektrische Anwendung von Halbleitern (Z. angew. Phys. 13, 435-444, 1961, no. 9).

De fenomenologische theorie van de thermo-elektrische effecten wordt behandeld voor zover dit nodig is voor het begrip van de erop volgende overwegingen over de geschiktheid van materialen voor technische toepassingen, zoals thermogeneratoren en warmtepompen. Van de theorie van de thermo-e.m.k. bij metalen en halfgeleiders wordt een plausibele voorstelling gegeven. Enige speciale halfgeleiders worden nader besproken en hun toepassing met voorbeelden toegelicht.

A 44: A. Klopfer: Das Erreichen und Messen von tiefen Drucken (Z. angew. Phys. 13, 480-491, 1961, no. 10).

Overzicht van de in de laatste tien jaar ontwikkelde methodes voor het bereiken en meten van zeer lage drukken (10^{-12} torr). Niet de pomp, maar de gasafgifte door de wanden en onderdelen die zich in het vacuüm bevinden, stelt een grens aan de bereikbare druk. Nadat middelen ter beperking van de gasafgifte zijn behandeld, bespreekt de auteur de verschillende typen vacuümpompen en manometers voor zeer lage drukken.

A 45: H. G. Reik en H. Risken: Distribution functions for hot electrons in many-valley semiconductors (Phys. Rev. 124, 777-784, 1961, no. 3).

Voor de gedetailleerde verklaring van het verband tussen stroom en spanning bij sterke elektrische velden in halfgeleiders, b.v. germanium van type N, kan men niet uitgaan van een eenvoudig parabolisch model van de bandenstructuur. Men moet hiervoor een gecompliceerdere structuur, de zg. meer-valleienstructuur, aannemen. Dit artikel bevat een bijdrage tot de theorie van het transport van elektronen, uitgaande van de vergelijking van Boltzmann voor elektronen in halfgeleiders met een meer-valleienstructuur, waarbij verstrooiing van elektronen in dezelfde vallei en tussen verschillende valleien plaatsvindt.

A 46: R. Groth en E. Kauer: Absorption freier Ladungsträger in α -SiC-Kristallen (Physica Status solidi 1, 445-450, 1961, no. 5).

Onderzoek van absorptie van straling door vrije ladingdragers in SiC-kristallen (met de meest voorkomende kristalstructuur, te weten 6 H) in het golflengtegebied van 1 tot 4 μm bij temperaturen T van 20 tot 1500 °C. Bij uitzetten

van de logarithme van de absorptiecoëfficiënt tegen $1/T$ krijgt men krommen die benaderd kunnen worden door twee rechte lijnen, waaruit de hoogte van de acceptorniveaus boven de valentieband en de afstand tussen de geleidingsband en de valentieband worden afgeleid. Bij kristallen van geleidings-type N wordt bij lage temperaturen de absorptie bepaald door verstrooiing door geïoniseerde onzuiverheden, en bij hoge temperaturen door thermische verstrooiing. De wijze waarop de absorptie afhangt van de golflengte, stemt goed met de theorie overeen. De verschuiving van de absorptiekant met de temperatuur is onderzocht tot 1500 °C.

A 47: R. Groth en R. Memming: Absorption freier Ladungsträger in CdS (Physica Status solidi 1, 650-655, 1961, no. 6).

Onderzoek van absorptie van de straling bij kamertemperatuur en bij 90 °K door vrije ladingdragers in CdS-kristallen van geleidings-type N waarin de concentratie n van de elektronen enige malen 10^{17} per cm^3 bedraagt. Bij 90 °K is de absorptiecoëfficiënt evenredig met λ^3 , zoals de theorie van H. J. G. Meyer voorspelt voor het geval van verstrooiing door geïoniseerde onzuiverheden. Bij kamertemperatuur is de verstrooiing reeds gedeeltelijk van thermische aard. Uit de metingen is afgeleid dat de effectieve massa der vrije ladingdragers 0,19 ($\pm 0,02$) maal de massa van een vrij elektron bedraagt. Verder wordt aangetoond dat men bij berekening van n met de formule $R_H = -r/ne$ (R_H = Hall-constante, e = lading van het elektron), in het oog moet houden dat de factor r afhangt van n als men met verstrooiing door onzuiverheden te maken heeft. Het verband tussen r en n wordt afgeleid.

A 48: H. G. Grimmeiss, A. Rabenau, H. Hahn en P. Ness: Über elektrische und optische Eigenschaften einiger Chalkogenide von Elementen der IV. Nebengruppe (Z. Elektrochem., Ber. Bunsenges. physik. Chem. 65, 776-783 1961, no. 9).

Elektrische en optische onderzoeken aan monokristallen van verbindingen tussen een der elementen Ti, Zr of Hf enerzijds (deze elementen behoren alle tot de nevengroep in kolom IV van het periodieke systeem) en een der elementen S, Se of Te anderzijds (deze elementen behoren tot de zg. chalcogenen, die in kolom VI van het periodieke systeem thuishoren). De bereiding der kristallen wordt besproken. Met uitzondering van TiS, dat een metallieke geleider bleek te zijn, zijn alle onderzochte verbindingen halfgeleiders. De verbindingen worden verdeeld in twee groepen. 1) De trichalkogeniden TiS_3 , ZrS_3 , ZrSe_3 en HfS_3 . Bij deze stoffen, die alle dezelfde kristalstructuur vertonen, zijn de volledige gegevens verkregen; o.a. is van alle de bandafstand bepaald. 2) De verbindingen TiS, TiSe, TiTe en Ti_3S_4 , met de kristalstructuur van NiAs of met een nauw daarmee verwante structuur, en de verbindingen TiS_2 , TiSe_2 en TiTe_2 , met de kristalstructuur van CdI_2 .

A 49: B. Lersmacher, E. Roeder en S. Scholz: Über das Kornwachstum von TaC und NbC unter dem Einfluß geringer Zusätze von Mn, Fe, Co und Ni (Naturwiss. 49, 35, 1962, no. 2).

TaC en NbC hebben eigenschappen waardoor zij in aanmerking komen voor gebruik als gloeilichaam voor gloeilampen (zij bezitten b.v. een zeer hoog smeltpunt); daarom interesseert men zich voor deze stoffen. Het artikel gaat over een onderzoek van het sinteren van de genoemde stoffen bij aanwezigheid van kleine hoeveelheden Mn, Te, Co of Ni.